

УДК 550.388.2

## ИОНОСФЕРНЫЙ ОТКЛИК ПОЛНОГО СОЛНЕЧНОГО ЗАТМЕНИЯ 11.08.1999 ПО ДАННЫМ ЕВРОПЕЙСКОЙ СЕТИ GPS

© 2001 г. Э. Л. Афраймович, Е. А. Косогоров, О. С. Лестюта

*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск*

Поступила в редакцию 07.03.2000 г.

После доработки 11.05.2000 г.

Приводятся результаты измерений основных параметров ионосферного отклика полного солнечного затмения 11 августа 1999 г. Используются данные около 70 станций глобальной сети GPS, расположенных в окрестности полосы максимальной фазы затмения в Европе. Для данного периода была характерна слабая геомагнитная возмущенность (в пределах  $-10 \dots -20$  нТл), что существенно упростило задачу детектирования ионосферного отклика затмения. Анализ выявил четкий эффект уменьшения (депрессии) полного электронного содержания (ПЭС) для всех станций GPS. Запаздывание между минимальным значением ПЭС относительно максимальной фазы вблизи полосы затмения монотонно увеличивается от 4 мин на долготе Гринвича (10.40 UT, LT) до 8 мин на долготе  $16^\circ$  (12.09 LT). Глубина и длительность депрессии ПЭС оказались равными соответственно 0.2–0.3 TECU и 60 мин. Полученные результаты находятся в хорошем согласии с данными проведенных ранее измерений и теоретическими оценками.

### ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальные наблюдения за ионосферой, проводимые во время солнечных затмений, являются источником информации о характере поведения различных ионосферных параметров. Регулярные ионосферные эффекты солнечных затмений более или менее изучены хорошо. Они сводятся к увеличению действующих высот отражения, снижению концентрации в максимуме  $F$ -слоя, уменьшению полного электронного содержания (ПЭС) в ионосфере, что характерно для перехода к ночной ионосфере [1]. Поведение перечисленных параметров может быть промоделировано с использованием соответствующих моделей ионосферы [2, 3].

Основными параметрами ионосферного отклика затмения являются величина запаздывания  $\tau$  относительно максимальной фазы затмения, а также его амплитуда  $A$  и длительность  $\Delta T$ . Практически во всех публикациях, посвященных изучению реакции ионосферы на солнечное затмение, приводятся оценки этих параметров.

Измерения  $\tau$  были проведены ранее путем анализа характеристик отраженного от ионосферы радиосигнала при вертикальном зондировании на сети ионосферных станций [3, 4, 5], при измерениях доплеровского смещения частоты при вертикальном и наклонном зондировании [3]. В этих работах величина  $\tau$  была определена в пределах от 0 [4] до 20 мин, амплитуда  $A$  уменьшения локальной концентрации электронов порядка  $9 \times 10^4 \text{ см}^{-3}$ , длительность отклика 1 ч [3].

Аналогичные результаты измерений на ионосферной станции были получены во время солнечного затмения 23 сентября 1987 г. в Юго-восточной Азии [6]. Амплитуда, запаздывание и длительность ионосферного отклика оказались равными  $0.3 \times 10^6 \text{ см}^{-3}$ , 18 мин и 1 ч 30 мин, соответственно. В то же время измерения во время затмения 24 октября 1995 г. в этом же регионе дали оценку  $\tau \sim 80$  мин [7],  $\Delta T = 1$  ч 20 мин,  $A$  более, чем  $1 \times 10^6 \text{ см}^{-3}$ . Измерения  $foF2$  над ст. *Scaramanga* во время частного солнечного затмения 20 мая 1966 г. [8] дают значение  $\tau \sim 38$  мин. В работе [9] время запаздывания реакции ионосферы на затмение составляло от 25 до 30 мин (на высоте 300 км).

Интересные результаты получены при наблюдении кольцевого солнечного затмения 30 мая 1984 г. на установке некогерентного зондирования в Милстон-Хилле [10]. Уменьшение электронной концентрации относительно максимальной фазы затмения в данном случае произошло через 20–30 мин,  $A = 4 \times 10^6 \text{ см}^{-3}$ ,  $\Delta T = 2$  ч 15 мин. Однако подобных установок слишком мало, чтобы их можно было широко использовать в экспериментах во время солнечных затмений.

Реакция ионосферы на полное солнечное затмение 9 марта 1997 г. исследована с помощью сети ионозондов [11]. Для этого события положение минимума провала во временной зависимости электронной концентрации сдвинуто относительно момента максимального закрытия диска Солнца на 10–15 мин,  $A = 1 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$ ,  $\Delta T = 1$  ч 15 мин.

Большой объем данных был получен при измерениях Фарадеевского вращения плоскости поляризации УКВ-сигналов геостационарных ИСЗ

[12–18]. Эти измерения выявили вызванный затмением эффект глубокой депрессии (уменьшения) ПЭС с амплитудой  $A$  от 2 до 14  $TECU$  с характерным временем уменьшения и восстановления ПЭС порядка нескольких часов (принятая в литературе единица измерения  $TECU$  соответствует величине  $10^{16} \text{ м}^{-2}$ ). Разброс величин  $\tau$  также оказался весьма широким – от 5 до 40 мин.

В работе [12] для полного солнечного затмения, произошедшего в весеннее время (7 марта 1970 г.), амплитуда  $A$  равна 11  $TECU$ ,  $\Delta T = 2 \text{ ч } 44 \text{ мин}$ ,  $\tau \sim 33 \text{ мин}$ . Для полного солнечного затмения 16 февраля 1980 наблюдения, проведенные на *Waltair* [18], дали следующие оценки:  $A = 0, 11 \text{ TECU}$ ,  $\Delta T = 1 \text{ ч}$ ,  $\tau = 20 \text{ мин}$ . *Essex* и др. [16] определили, что для полного солнечного затмения 20 февраля 1979 г. величины  $A$ ,  $\tau$  равны 14  $TECU$  и 33 мин соответственно.

Таким образом, многочисленные экспериментальные данные не позволяют получить более или менее достоверные оценки основных параметров ионосферного отклика. Одна из причин столь большого разброса может быть связана с применением различных методов измерений, весьма отличающихся пространственным и временным разрешением. Однако основная причина определяется различными характеристиками самого затмения, геофизическими условиями отдельных измерений и большим разбросом широты, долготы и местного времени при проведении экспериментов.

Для получения более достоверной информации о поведении ионосферы во время затмения необходимо проведение одновременных измерений на большой площади, охватывающей районы с различным местным временем. В то же время необходимо высокое пространственное (не хуже десятков км) и временное (не хуже 1 мин) разрешение. Однако, ни один из перечисленных известных методов не удовлетворяет подобным требованиям.

Новую эру в дистанционной диагностике ионосферы открывает развитие глобальной навигационной системы *GPS* и создание на ее основе широко разветвленных сетей станций *GPS*, насчитывающих к апрелю 2000 г. не менее 700 пунктов, данные которых поставляются в INTERNET [19]. С помощью двухчастотных многоканальных приемников системы *GPS* практически в любой точке земного шара и в любое время одновременно на двух когерентно-связанных частотах  $f_1 = 1575.42 \text{ МГц}$  и  $f_2 = 1227.60 \text{ МГц}$  осуществляются высокоточные измерения группового и фазового запаздывания на луче зрения между приемником на земной поверхности и передатчиками на ИСЗ, находящимися в зоне приема. Чувствительность фазовых измерений в системе *GPS* позволяет детектировать неоднородности с амплитудой до  $10^{-3}$ – $10^{-4}$  от суточного изменения ПЭС.

*Afraimovich* и др. в работе [20] впервые применили для детального анализа регулярных ионосферных эффектов измерения ПЭС и его градиента во время полного солнечного затмения 9 марта 1997 г., используя *GPS*-интерферометр в Иркутске. Полученные данные свидетельствуют о глубоких изменениях в процессе ионообразования в ионосфере во время солнечного затмения одновременно в большом объеме пространства с радиусом на высоте 300 км не менее 300 км. Запаздывание минимального значения ПЭС относительно максимальной фазы составляет  $\sim 10 \text{ мин}$ , глубина депрессии ПЭС от 1 до 3  $TECU$ , а  $\Delta T = 1 \text{ ч } 15 \text{ мин}$ .

*Boitman* и др. в [3] получили хорошее согласие этих данных, а также результатов измерений на нескольких КВ трассах доплеровского зондирования, с результатами численного моделирования с использованием модели ионосферно-плазмосферного взаимодействия [21]. К сожалению, во время этого затмения в полосе полной тени в 1997 г. было мало станций *GPS*, что не позволило определить пространственно-временные характеристики ионосферного отклика.

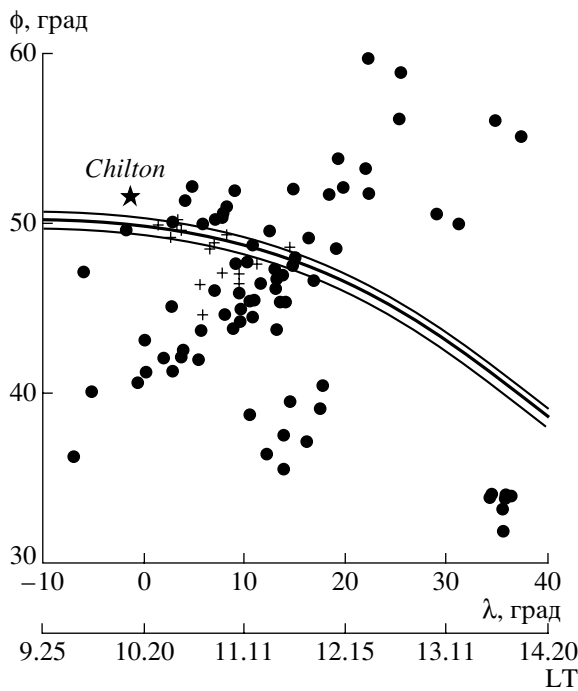
По данным 5 станций *GPS* *H. F. Tsai* и *J. Y. Liu* [22] для солнечных затмений 24 октября 1995 г. и 9 марта 1997 г. запаздывание  $\tau$  менялось в широких пределах – от 0 до 30 мин, амплитуда  $A$  была близка к 7  $TECU$ ,  $\Delta T$  изменялось от 40 мин до 1 ч.

Уникальная возможность для использования потенциала сети *GPS* представилась во время полного солнечного затмения 11 августа 1999 г. Для этого периода времени по сети INTERNET оказались доступными данные не менее 100 станций *GPS*, расположенных в Западной и Центральной Европе в полосе полной тени и вблизи к ней. Следует ожидать целой серии исследований различных ионосферных эффектов этого затмения на основе данных *GPS* в комплексе с данными других наблюдательных средств. Целью настоящей работы является их использование для определения основных параметров ионосферного отклика на полное солнечное затмение 11 августа 1999 г.

#### ГЕОМЕТРИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБЩИЕ ДАННЫЕ О СОЛНЕЧНОМ ЗАТМЕНИИ 11 АВГУСТА 1999 Г.

Последнее солнечное затмение 20-го столетия началось в Северном Атлантическом океане. Полная тень достигла юго-западного побережья Англии в 10.10 UT; при этом Солнце находилось под углом  $45^\circ$  над восточным горизонтом. Средняя продолжительность затмения здесь равнялась 2 мин и ширина пути составляла 103 км.

На рис. 1 представлена схематическая карта движения лунной тени по поверхности земли в Западной и Центральной Европе (при построе-



**Рис. 1.** Схематическая карта движения лунной тени по поверхности земли в Западной и Центральной Европе. Жирной показана центральная линия затмения на уровне поверхности Земли, а тонкими линиями - южная и северная границы. Значки плюсики и точек обозначают места расположения GPS станций - полный набор (данные станции использовались при расчете параметров первой строки в табл. 2). Символы плюсики соответствуют ближней зоне (станции этой группы использованы при расчете параметров второй строки в табл. 2). Местоположение ионосферной ст. *Chilton* (RAL) показано звездочкой. Цифрами для долгот  $10^{\circ}W, 0^{\circ}, 10^{\circ}E, 20^{\circ}E, 30^{\circ}E, 40^{\circ}E$  обозначено местное время наступления максимальной фазы на уровне земли. Значок  $\phi$  - широта,  $\lambda$  - долгота.

нии использовались данные [23]). Жирной показана центральная линия затмения на уровне поверхности земли, а тонкими линиями - южная и северная границы. Положение контрольной ионосферной станции *Chilton* (RAL) обозначено звездочкой. Жирные точки и значки плюсики отмечают места расположения выбранных для анализа GPS станций; их географические координаты приведены в табл. 1. Жирные точки совместно со значками плюсики приняты к рассмотрению как полный набор GPS станций. Значки плюсики соответствуют сети GPS станций, расположенных вблизи полосы затмения, поэтому эта группа названа нами как ближняя зона. Цифрами для долгот  $10^{\circ}W, 0^{\circ}, 10^{\circ}, 20^{\circ}, 30^{\circ}, 40^{\circ}E$  обозначено местное время наступления максимальной фазы на уровне земли.

В данной работе мы ограничились анализом только района Западной и Центральной Европы от побережья Южной Англии до точки с коорди-

натами  $56.03^{\circ}N$  и  $37.2^{\circ}E$ , где полная фаза наблюдалась в 11.20 UT (14.20 LT). Таким образом, воздействие солнечного затмения в выбранном регионе произошло для состояния дневной летней ионосферы.

Расстояние по дуге большого круга между названными крайними точками составляет  $\sim 2900$  км при разнице времени всего 67 мин. Таким образом, характерной особенностью данного затмения была сверхзвуковая скорость перемещения лунной тени по поверхности Земли, превышающая 720 м/с.

На ионосферных высотах область полной тени пролегла немного южнее. Момент наступления максимальной фазы покрытия для высоты  $h = 300$  км над Будапештом опережает момент наступления наибольшей фазы на земле на 1.3 мин. Разница в значениях максимальных фаз и времени их наступления обусловлена высотой Солнца над горизонтом. В момент наибольшей фазы в Будапеште (11.05 UT или 14.05 LT) она составляла всего  $59^{\circ}$ .

Для данного периода была характерна слабая геомагнитная возмущенность (в пределах  $-10 \dots -20$  нТл), что существенно упростило задачу детектирования ионосферного отклика затмения.

### ОТКЛИК ИОНОСФЕРЫ НА ЗАТМЕНИЕ ПО ДАННЫМ ИОНОСФЕРНОЙ СТАНЦИИ CHILTON

Рассмотрим вначале вариации ионосферных параметров в интервале времени 06.00–15.00 UT 11 августа 1999 г. и фоновые дни 10 и 12 августа по данным ст. *Chilton* (RAL;  $51.6^{\circ}N$  и  $1.3^{\circ}W$ ) - рис. 2. Эти данные получены нами по сети INTERNET (<http://www.wdc.rl.ac.uk/wdcc1/data.html>). Точками обозначены изменения критических частот  $foF2$  (панель а),  $foF1$  (панель в), кажущихся высот  $h'F$  (панель б) и  $h'F2$  (панель г) за 11 августа 1999 г. (здесь и далее речь идет о высотах области F и выше). Сплошными кривыми обозначены те же значения, сглаженные с временным "окном" 60 мин. Для 10 и 12 августа приведены только сглаженные кривые, с тем же временным "окном" 60 мин. Время наступления максимальной фазы затмения (10.16 UT) на уровне 300 км в месте расположения станции показано тонкой вертикальной линией.

Наиболее четко воздействие затмения проявляется в вариациях критических частот  $foF2$ , максимальное отличие которой от фоновых значений 10 и 12 августа в момент достижения минимума (10.20 UT) составило до 2 МГц. С другой стороны, амплитуда уменьшения  $foF2$  для события 11 августа (после максимальной фазы затмения) не превышает 1 МГц. Воздействие затмения на другие параметры проявляется не так четко и

Таблица 1. Названия и географические координаты GPS станций

N	Станция	$\phi^\circ, N$	$\lambda^\circ, E$	N	Станция	$\phi^\circ, N$	$\lambda^\circ, E$
1	BELL	41.600	1.401	29	MADR	40.429	4.250
2	BORI	52.277	17.073	30	MATE	40.649	16.704
3	BRST	48.380	-4.496	31	MDVO	56.027	37.223
4	BRUS	50.798	4.359	32	MEDI	44.520	11.647
5	BSHM	32.779	35.023	33	MEEU	51.106	5.556
6	BZRG	46.499	11.337	34	MEMB	50.590	5.977
7	CAGL	39.136	8.973	35	METS	60.217	24.395
8	COSE	39.201	16.310	36	MOPI	48.372	17.274
9	CREU	42.319	3.316	37	NOTO	36.876	14.990
10	DENT	50.934	3.400	38	OBER	48.086	11.280
11	DOUR	50.095	4.595	39	PATK	47.208	11.460
12	EBRE	40.821	0.492	40	PFAN	47.515	9.785
13	GENO	44.419	8.921	41	RAMO	30.598	34.763
14	GILB	32.479	35.416	42	RIGA	56.949	24.059
15	GLSV	50.364	30.497	43	SBGZ	47.803	13.110
16	GOPE	49.914	14.786	44	SFER	36.464	6.206
17	GRAA	47.067	15.493	45	SJDV	45.879	4.677
18	GRAS	43.755	6.921	46	TELA	32.068	34.781
19	GRAZ	47.067	15.493	47	TORI	45.063	7.661
20	HERS	50.867	0.336	48	TOUL	43.561	1.481
21	HFLK	47.313	11.386	49	UPAD	45.407	11.878
22	JOZE	52.097	21.031	50	VENE	45.437	12.331
23	KABR	33.022	35.145	51	WARE	50.690	5.245
24	KARL	49.011	8.411	52	WSRT	52.915	6.604
25	KATZ	32.995	35.688	53	WTZR	49.144	12.879
26	KOSG	52.178	5.810	54	WTZT	49.144	12.879
27	LAMA	53.892	20.670	55	ZIMM	46.877	7.465
28	LAMP	35.500	12.606				

заметно только при сравнении сглаженных кривых. Аналогичные результаты измерений на ионосферной станции были получены во время солнечного затмения 23 сентября 1987 г. в Юго-восточной Азии [6].

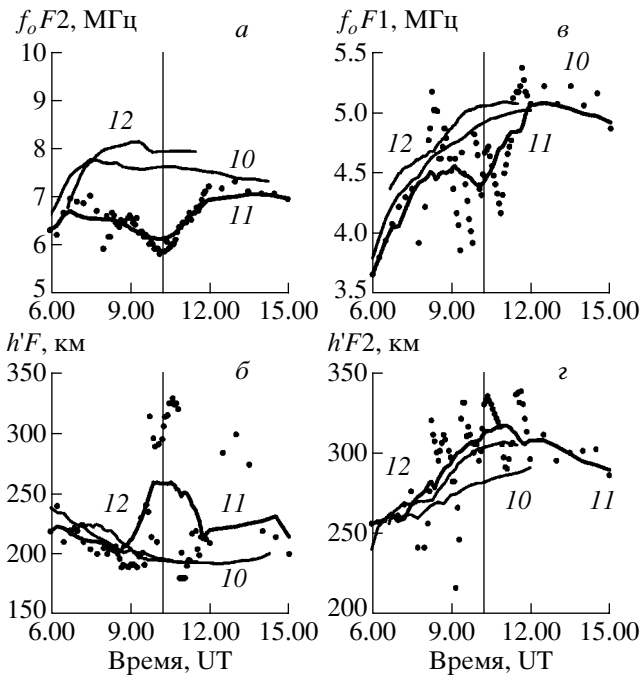
Более детально вариации  $foF2$ , измеренные на ст. *Chilton (RAL)* с временным шагом 4 мин, представлены на рис. 3а (жирные точки). Проведенная через эти точки сплошная кривая является аппроксимирующей для этих значений. На этой же панели нанесена геометрическая функция затмения  $S(t)$  на высоте 300 км, рассчитанная для ст. *Chilton*. Минимальные значения  $foF2$  и  $S(t)$  соответствуют на рисунке точкам *B* и *A*. Соответствующее запаздывание  $\tau$  между моментом минимума  $foF2$  и функции  $S(t)$  в данном случае близко к 4 мин. Данные измерений на ионосферной ст. *Chilton* совпадают с аналогичными измерениями на ио-

носферной станции *Helston* ( $50^\circ 06'N$ ,  $5^\circ 18'W$ ), представленными в работе [24].

Сравнение данных ст. *Chilton (RAL)* и для ближайшей к ней GPS ст. *HERS* обсуждается в следующем разделе.

#### ОБРАБОТКА ДАННЫХ GPS-СЕТИ И РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ИОНОСФЕРНОГО ЭФФЕКТА СОЛНЕЧНОГО ЗАТМЕНИЯ 11 АВГУСТА 1999 Г.

Изложим кратко последовательность процедур обработки данных GPS. Первичными данными являются ряды “наклонного” значения ПЭС  $I(t)$ , а также соответствующие им ряды значений угла места  $\theta(t)$ , отсчитываемого от земной поверхности, и азимута  $\alpha(t)$  луча зрения на ИСЗ, отсчитываемого от направления на север по часо-



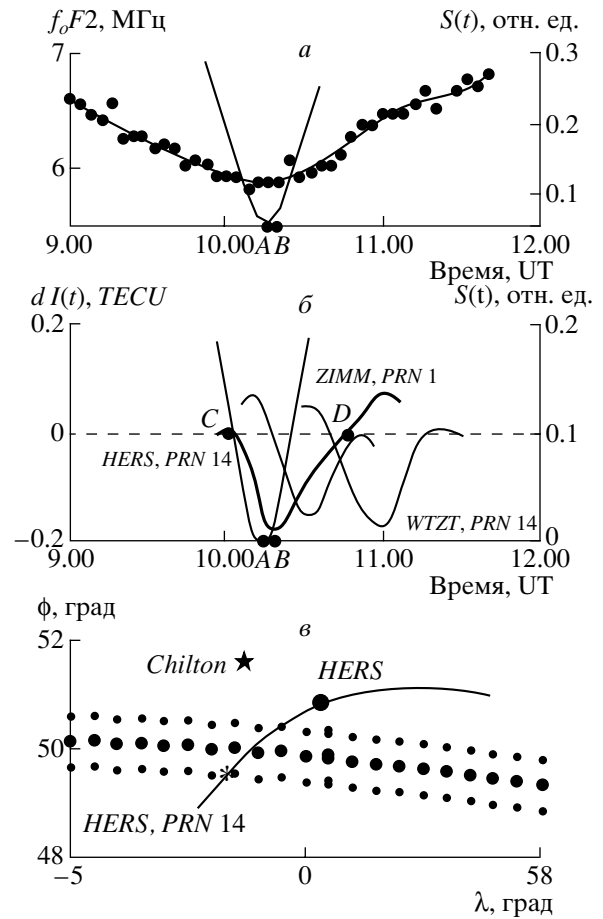
**Рис. 2.** Вариации ионосферных параметров в интервале времени 06.00–15.00 UT 11 августа 1999 г. и фоновые дни 10 и 12 августа по данным ст. *Chilton (RAL)*. Точками обозначены изменения критических частот  $foF2$  (панель *a*),  $foF1$  (панель *v*), кажущихся высот  $h'F$  (панель *б*) и  $h'F2$  (панель *z*). Сплошными кривыми обозначены те же значения, сглаженные с временным “окном” 60 мин (для 10 и 12 августа приводятся только сглаженные кривые). Время наступления максимальной фазы затмения на уровне 300 км показано вертикальной сплошной линией.

вой стрелке. Эти параметры рассчитываются по разработанной нами программе CONVTEC, которая преобразует полученные по сети INTERNET стандартные для системы GPS RINEX-файлы. Ряды значений угла места  $\theta(t)$  и азимута  $\alpha(t)$  луча на ИСЗ используются для определения координат подионосферных точек. В нашем случае все результаты получены для углов места  $\theta(t)$  больше  $45^\circ$ .

На рис. 3*в* представлена геометрия эксперимента в районе ионосферной ст. *Chilton (RAL)* – звездочка и ст. *GPS HERS* – жирная точка. Жирными точками показана центральная линия затмения на уровне поверхности земли, а маленькими точками – южная и северная границы. Символом снежинки показано положение подионосферной точки в момент максимального отклика ПЭС (см. ниже).

Вариации “наклонного” ПЭС  $I(t)$  определяются на основе фазовых измерений в каждом из разнесенных в пространстве двухчастотных приемников GPS с использованием известной формулы [20]

$$I = \frac{1}{40.308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [(L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2) + \text{const} + nL], \quad (1)$$



**Рис. 3.** *a* – значения критической частоты  $foF2$ , измененные 11 августа 1999 г. на ст. *Chilton (RAL)* с временным шагом 4 мин в интервале времени 09.00–12.00 UT (точки). Проведенная через эти точки сплошная кривая является аппроксимирующей для этих значений. На этой же панели нанесена геометрическая функция затмения на высоте 300 км  $S(t)$ , рассчитанная для ст. *Chilton*; *б* – отфильтрованные вариации полного электронного содержания  $dI(t)$  для станции *HERS (PRN 14)* за 11 августа 1999 г. На этой же панели нанесена геометрическая функция затмения на высоте 300 км  $S(t)$ , рассчитанная для ст. *Chilton*; *б* – отфильтрованные вариации полного электронного содержания  $dI(t)$  для ст. *HERS (PRN 14)* за 11 августа 1999 г. На этой же панели нанесена геометрическая функция затмения на высоте 300 км  $S(t)$ , рассчитанная для подионосферной точки PRN 14. Для сравнения там же даны вариации  $dI(t)$  для ст. *ZIMM* и *WTZT*, отстоящих от ст. *HERS* соответственно на  $7^\circ$  и  $13^\circ$  по долготе на восток. *в* – геометрия эксперимента в районе ионосферной ст. *Chilton (RAL)* – звездочка и ст. *GPS HERS* (большой светлый круг). Жирными точками показана центральная линия затмения на уровне поверхности земли, а маленькими знаками точек – южная и северная границы. Значком снежинки показано положение подионосферной точки в момент максимального отклика ПЭС.

где  $L_1 \lambda_1$  и  $L_2 \lambda_2$  – приращения фазового пути радиосигнала, вызванные задержкой фазы в ионосфере (м);  $L_1, L_2$  – число полных оборотов фазы, а  $\lambda_1, \lambda_2$  – длины волн (м) для частот  $f_1$  и  $f_2$ ; const – неко-

**Таблица 2.** Параметры ионосферного отклика затмения

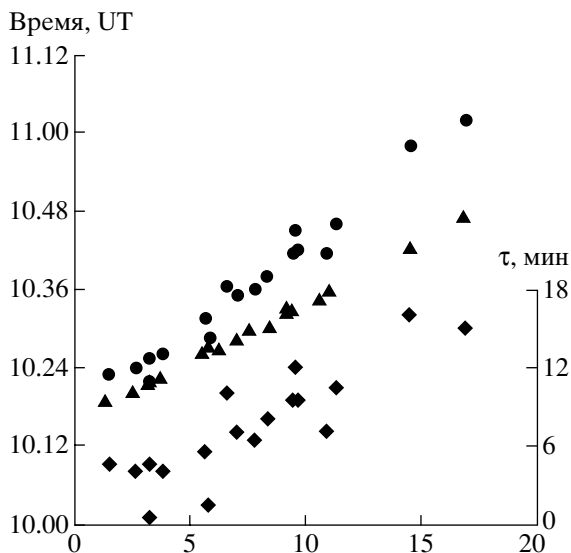
N	Количество подионосферных точек	A, TECU	$\Delta T$ , мин	$\tau$ , мин
1	98	0.298/0.197	62/32	16.4/14
2	19	0.193/0.081	61/36	8/4

торый неизвестный начальный фазовый путь (м);  $nL$  – ошибка в определении фазового пути (м).

В настоящее время разрабатываются различные методы восстановления абсолютного значения ПЭС с использованием измерений как фазового, так и группового запаздывания, однако до сих пор не существует эффективных алгоритмов для точного решения этой задачи для различных типов двухчастотных приемников и режимов работы системы *GPS*. В связи с этим в рамках данной работы мы ограничиваемся рассмотрением только вариаций ПЭС, полученных по данным измерения фазового запаздывания по формуле (1).

Для приближенного задания постоянной составляющей ПЭС  $I_0$  мы использовали получаемые через INTERNET данные соответствующих глобальных карт абсолютного вертикального значения ПЭС в формате IONEX [25]. Для нормировки амплитуды отклика использовалось преобразование “наклонного” ПЭС в эквивалентное “вертикальное” значение

$$I(t) = I(t) \sin(\theta(t)). \quad (2)$$



**Рис. 4.** Долготная зависимость временного положения минимумов кривых  $dl(t)$  для станций ближней зоны – жирные точки. Знаками треугольников отмечены вариации максимальной фазы затмения на высоте 300 км для подионосферных точек в функции долготы. Символами ромбиков изображается долготная зависимость запаздывания  $\tau$  отклика ПЭС  $dl(t)$ .

Хотя вследствие сильного горизонтального градиента ПЭС и без учета сферичности задачи эта процедура дает весьма приближенный результат, он вполне приемлем, поскольку все результаты получены нами для углов места  $\theta(t)$  больше  $45^\circ$ .

С целью исключения вариаций регулярной ионосферы, а также трендов, внесенных движением спутника, используется процедура удаления тренда с предварительным сглаживанием исходного ряда с временным “окном” в диапазоне от 40 до 100 мин, подбираемым для каждой реализации ПЭС. Такая процедура необходима также для более четкого выделения ионосферного отклика данного затмения, характеризующегося сравнительно малой амплитудой (см. ниже) на фоне несвязанных с затмением пространственно-временных изменений ПЭС.

На рис. 3б приведены отфильтрованные вариации ПЭС  $dl(t)$  для ст. *HERS* для ИСЗ N14 (PRN 14) за 11 августа 1999 г. (жирная линия). На этой же панели нанесена геометрическая функция затмения на высоте 300 км  $S(t)$ , рассчитанная для подионосферной точки PRN 14. Минимальное значение  $S(t)$  соответствует на рисунке точке А.

Как видно из рисунка, отфильтрованные вариации по форме близки к треугольнику, вершина которого (точка В) соответствует моменту достижения минимального значения ПЭС. Сама величина  $dl_{\min}$  может служить оценкой амплитуды отклика ПЭС на затмение, а интервал времени между моментами пересечения линии  $dl = 0$  (точки С и D) – оценкой длительности отклика  $\Delta T$ . Соответствующее запаздывание  $\tau$  между моментами минимумов  $dl_{\min}$  и функции  $S(t)$  в данном случае оказалось равным 4 мин, что совпадает с оценкой  $\tau$  для ионосферной ст. *Chilton*. Амплитуда отклика в данном случае близка к 0.18 TECU, а длительность отклика – 46 мин.

Подобные вариации  $dl(t)$  характерны для всех перечисленных в табл. 1 названий станций *GPS* и номеров спутников 01 и 14. Выбор одних и тех же спутников PRN 01 и PRN 14 для всего набора выбранных станций *GPS* определялся тем, что для этих спутников максимальное значение угла места  $\theta$  луча на ИСЗ для интервала времени 10.00–12.30 UT превышало  $45^\circ$ , что свело к минимуму возможную ошибку преобразования в “вертикальное” значение ПЭС вследствие сферичности.

Для сравнения на рис. 3б даны вариации  $dl(t)$  для станций *ZIMM* и *WTZT*, отстоящих от ст. *HERS* соответственно на  $7^\circ$  и  $13^\circ$  по долготе на восток. Как видно из рисунка, отклики на затмение на этих станциях весьма подобны как по форме, так и по амплитуде, но запаздывание отклика увеличивается с долготой.

В первой строчке табл. 2 приведены результаты статистической обработки для полного набо-

ра станции *GPS*, упомянутых в табл. 1. Во второй строчке учитываем только те станции, которые лежат в непосредственной близости к полосе затмения (в пределах  $\pm 5^\circ$  относительно центральной линии (ближняя зона). В табл. 2 значения до черты относятся к средним величинам, а после черты – к среднеквадратическому отклонению. Среднее значение  $\tau$  для всего набора станций составляет 16 мин; для станций ближней зоны это значение равно 7 мин. Среднее значение амплитуды для всех станций  $A = 0.3 \text{ TECU}$  и для ближней зоны  $A = 0.1 \text{ TECU}$ . Ширина провала ПЭС для дальней и ближней зон в среднем равна  $\Delta T = 60$  мин.

На рис. 4 представлена долготная зависимость временного положения  $t_{\min}$  минимумов кривых  $dI(t)$  для подионосферных точек, находящихся в непосредственной близости от полосы затмения (спутники 1, 14) – жирные точки. Затемненными значками треугольников обозначены времена максимальных фаз геометрической функции затмения в зависимости от долготы, рассчитанные для подионосферных точек. Закрашенные символы ромбиков соответствуют временам запаздывания между максимумом геометрической функции затмения и минимумом в ПЭС.

Оказалось, что запаздывание  $\tau$  монотонно увеличивается от 4 мин на долготе Гринвича (10.23 UT, LT) до 8 мин на долготе  $16^\circ$  (12.09 LT).

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты находятся в хорошем согласии с данными проведенных ранее измерений и теоретическими оценками (см. обзор данных во Введении). Основным отличием наших данных является более высокая достоверность определения основных параметров отклика затмения, обусловленная высоким пространственно-временным разрешением и повышенной чувствительностью детектирования ионосферных возмущений используемого нами метода *GPS*-решеток.

При этом надо учесть, что отличительной особенностью данного затмения была сравнительно малая амплитуда отклика, что потребовало специальной фильтрации рядов ПЭС (см. предыдущий раздел). Это связано с тем, что в отличие от ряда затмений, по которым получены более или менее достоверные данные, это затмение происходило в летнее время, для которого характерны незначительные отличия дневной и ночной ионизации. Кроме того, в этой ситуации во временном ходе  $foF2$  и ПЭС вблизи полдня обычно отмечается минимум, который, по существу, маскирует эффект затмения. Важно также, что постоянная времени уменьшения ионизации в максимуме  $F_2$  существенно превышает длительность основной фазы затмения, что также приводит к уменьше-

нию амплитуды отклика. Оценки амплитуды отклика в полном электронном содержании по моделям проведены в работах [2, 3] также для весеннего времени года.

Обнаруженная в настоящей работе зависимость  $\tau$  от местного времени согласуется с теоретическими оценками, полученными в работе [2]. Значение  $\tau$  для  $foF2$ , близкое к 6 мин, соответствовало местному времени 13.40 LT. Ивельская и др. [26] методами моделирования показали, что изменения времени запаздывания  $\tau$  минимума локальной концентрации электронов  $N_e(t)$  относительно минимума функции ионообразования следующие: на высоте 150 км  $\tau = 1-2$  мин; на 200 км  $\tau = 3$  мин; на 300 км  $\tau = 20$  мин, а выше 600 км  $\tau = 45$  мин. В этой работе оценка  $\tau$  порядка 3 мин на высоте 200 км и 40 мин на высоте 300 км была получена для местного времени 12 LT.

Авторы благодарят К.С. Паламарчука за помощь при подготовке данных, а также А.В. Тащилина и А.Д. Калихмана за интерес к данной работе и активное участие в дискуссиях. Эта работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 99-05-64753).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Cohen E.A.* The study of the effect of solar eclipses on the ionosphere based on satellite beacon observations // *Radio Sci.* 1984. V. 19. № 5. P. 769.
2. *Stubbe P.* The F region during an eclipse – theoretical study // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1970. V. 32. № 8. P. 1109.
3. *Boitman O.N., Kalikhman A.D., Tashchilin A.V.* The mid-latitude ionosphere during the total solar eclipse of March 9, 1997 // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. № 12. P. 28197.
4. *Marriott R.T., John D.E. St., Thorne R.M. et al.* Ionospheric effects of two recent solar eclipses // *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1972. V. 34. № 4. P. 695.
5. *Гончаров Л.П., Ситнов Ю.С.* Эффекты солнечного затмения над Кубой // *Ионосфер. прогноз.* 1982. № 4. С. 169.
6. *Kang Cheng, Yinn-Nien Huang, Sen-Wen Chen.* Ionospheric Effects of Solar Eclipse of September 23, 1987, Around the Equatorial Anomaly Crest Region // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. № 3. P. 103.
7. *Huang C.R., Liu C.H.* A study of tomographically reconstructed ionospheric images during a solar eclipse // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. № 1. P. 79.
8. *Anastassiadis M., Matsoukas D.* Electron content measurements by beacon S-66 satellite during May 20, 1966 solar eclipse // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1970. V. 34. № 9. P. 695.
9. *Жеребцов Г.А., Медведев А.В., Потезин А.П., Шпынев Б.Г.* Эффекты в ионосфере во время солнечного затмения 9 марта 1997 года по данным наблюдения на иркутском радаре некогерентного рассеяния // *Исслед. по геомагнетизму, аэронамии и физике Солнца.* 1998. № 109. С. 46.

10. *Salah J.E., Oliver W.L., Foster J.C.* Observations of the May 30, 1984, annular solar eclipse at Millstone Hill // *J. Geophys. Res.* 1986. V. A91. № 12. P. 1651.
11. *Жеребцов Г.А., Клименко В.В., Клименко В.И.* Исследование эффекта солнечного затмения 9 марта 1997 года в ионосфере азиатской части России // *Исслед. по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца.* 1998. № 109. С. 51.
12. *Klobuchar J.A., Malik C.* Comparison of changes in total electron content along three paths // *Nature.* 1970. V. 226. № 9. P. 1113.
13. *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. V. 250. № 6. P. 205.
14. *Davies K.* Recent progress in satellite radio beacon studies with particular emphasis on the ATS-6 radio beacon experiment // *Space Sci. Rev.* 1980. V. 25. № 7. P. 357.
15. *Rama Rao P.V.S.* TEC observations at Waltair during the total solar eclipse of 16 february 1980 // *Proc. Indian Nat. Sci. Acad.* 1982. V. 48. № 3. P. 434.
16. *Essex E.A., Klobuchar J.A., Philbrick C.R., Leo R.* Response the total electron content of the ionosphere over North America to the total solar eclipse of 26 February, 1979 // *Proc. Indian Nat. Sci. Acad.* 1982. V. 48. № 3. P. 444.
17. *Deshpande M.R., Chandra H., Sethia G.* Effects of the total solar eclipse of 16 February 1980 on TEC at low latitudes // *Proc. Indian. Nat. Sci. Acad.,* 1982. V. A48. № 3. P. 427.
18. *Singh L., Tyagi T.R., Somayajulu Y.V.* A multi-station satellite radio beacon study of ionospheric variations during total solar eclipses // *J. Atmos. Terr. Phys.,* 1989. V. 51. № 3. P. 271.
19. *Klobuchar J.A.* Real-time ionospheric science: The new reality // *Radio Sci.* 1997. V. 32. № 10. P. 1943–1952.
20. *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.* 1988. V. 25. № 4. P. 465.
21. *Кринберг И.А., Тауцилин А.В.* Ионосфера и плазмосфера // М.: Наука, 1984. 189 с.
22. *Tsai H.F., Liu J.Y.* Ionospheric total electron content response to solar eclipses // *J. Geophys. Res.,* 1999. V. 104. № 6. P. 657.
23. *Espenak F., Anderson J.* Total solar eclipse of 1999 August 11, NASA Reference Publication 1398 // 1999. <http://sunearth.gsfs.nasa.gov/eclipse/TSE1999/TSE1999.html>.
24. *Davis C.J., Lockwood M., Bells S.A., et al.* Ionospheric measurements of relative coronal brightness during the total solar eclipses of 11 August, 1999 // *Ann. Geophys.* 2000. V. 18. № 2. P. 182.
25. *Mannucci A.J., Ho C.M., Lindqwister U.J.* A global mapping technique for GPS-driven ionospheric TEC measurements // *Radio Sci.* 1998. V. 33. № 8. P. 565.
26. *Ивельская М.К., Сутырина Г.Е., Суходольская В.Е.* Моделирование эффекта солнечного затмения в ионосфере при различных способах задания электронной температуры // *Исслед. по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца.* 1977. М.: Наука, 1977. № 41. 62 с.