

# Ионосферные эффекты полного солнечного затмения 22 июля 2009 г. по данным плотной сети GPS в Японии (GEONET)

Э.Л. Афраимович, С.В. Воейков, И.К. Едемский

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
664033 Иркутск, Лермонтова 126а, а/я 291  
E-mail: serg3108@iszf.irk.ru*

В статье приведены результаты анализа регулярного ионосферного отклика на солнечное затмение (СЗ) 22 июля 2009 г. по данным измерений полного электронного содержания на плотной сети двухчастотных приемников GPS, расположенных в Японии (сеть GEONET насчитывает более 1200 станций). Отклик на СЗ надежно регистрировался только на близком расстоянии от области полной тени, где максимальная фаза затмения превышала ~85%. Величина запаздывания минимума отклика ПЭС относительно максимальной фазы СЗ составляла не более 6 минут. Амплитуда отклика практически линейно уменьшалась с увеличением расстояния до полной лунной тени от -0.35 до -0.15 TECU.

**Ключевые слова:** ионосферные возмущения, солнечное затмение, полное электронное содержание, GPS.

## Введение

Наблюдения за возмущением ионосферы во время солнечных затмений (СЗ), проводимые с использованием радиофизических методов [1, 2], а также спутниковых измерений [3], позволяют получить информацию о процессах в полосе лунной тени и ее окрестностях в условиях достаточно точно оцениваемых вариаций потока солнечного излучения. В общем случае реакция ионосферы на прохождение лунной тени в верхних слоях атмосферы проявляется в ряде наблюдаемых эффектов, таких как уменьшение полного электронного содержания (ПЭС), возрастание минимальной высоты F-слоя и действующих высот отражения, падение концентрации в максимуме F-слоя, обычно характерных для ночной ионосферы. В средних широтах солнечные затмения, особенно полные, происходят относительно редко, поэтому в настоящее время не существует детальной и общепринятой модели реакции среднеширотной ионосферы на солнечное затмение.

Несмотря на то, что регулярному ионосферному отклику на СЗ посвящено множество работ (например, [4-6]), в его изучении нет полной ясности. От события к событию наблюдается большой разброс значений основных параметров – величины запаздывания  $t$  относительно максимальной фазы затмения, амплитуды  $A$  и длительности  $\Delta T$ ,

В настоящей работе представлены результаты первичного анализа регулярного ионосферного эффекта полного СЗ, наблюдавшегося 22 июля 2009 г., по данным GPS. Уникальность этого события заключается как минимум в том, что впервые полное солнечное затмение проходило в непосредственной близости от самой плотной на сегодняшний день сети двухчастотных наземных приемников GPS – GEONET (1220 станций).

## Параметры затмения и обработка данных

Солнечное затмение 22 июля 2009 г. началось примерно в 01:00 UT над Индией, пересекло Китай, в 02:00 UT (~11:00 LT) прошло в ~100 км южнее Японии и после 04:00

УТ завершилось в южной части Тихого океана. Это затмение считается очень продолжительным – максимальная фаза затмения на достаточно большом участке траектории СЗ длилась более 6 минут. В районе Японии лунная тень двигалась со скоростью  $\sim 670$  м/с, что сравнимо со скоростью звука на высотах F-слоя ионосферы.

Геомагнитную обстановку за период прохождения лунной тени вблизи Японии можно охарактеризовать как слабовозмущенную ( $K_p = 3$ ). В рассматриваемый период времени не наблюдалось увеличения сейсмической активности, не было солнечных вспышек

Методы определения ионосферных параметров на основе фазовых измерений GPS сигналов были описаны в нескольких работах, включая работу [7]. Измерения фазы в системе GPS проводятся с высокой степенью точности, при которой ошибка в определении вариаций ПЭС не превышает  $10^{14}$  эл/м<sup>2</sup>. Это позволяет изучать вариации ПЭС в широком динамическом диапазоне, достигающем  $10^{-4}$  от полного суточного изменения ПЭС. Для измерения ПЭС использовалась общепринятая единица TECU, равная  $10^{16}$  эл/м<sup>2</sup>. В данном методе первичными данными являются временные ряды измерений ПЭС  $I(t)$  вдоль наклонного луча, связывающего приемник GPS и ИСЗ, а также соответствующие им ряды угла места и азимута текущего направления на ИСЗ. Наиболее достоверные результаты определения параметров ионосферы соответствуют большим углам места ИСЗ, поэтому среди созвездия спутников, постоянно «видимых» в любой точке земного шара, следует выбирать спутники с максимальными углами места. В нашем эксперименте такому условию соответствовал спутник с номером prn 14.

С целью исключения регулярных вариаций ионосферы, а также трендов, обусловленных движением спутника, была использована процедура удаления тренда скользящим окном длительностью 60 мин.

Для привязки зарегистрированных данных по времени производился расчет геометрической функции затмения  $\Phi(t)$  по алгоритму, описанному в [8]. Для проверки точности определения функции затмения было произведено сравнение рассчитанных значений  $\Phi(t)$  с её табличными значениями для трех пунктов. Пункты выбирались вблизи от полосы прохождения полного затмения, но за пределами этой полосы. Наибольшее отклонение расчетного времени максимальной фазы затмения от табличной составило  $\sim 2$  мин.

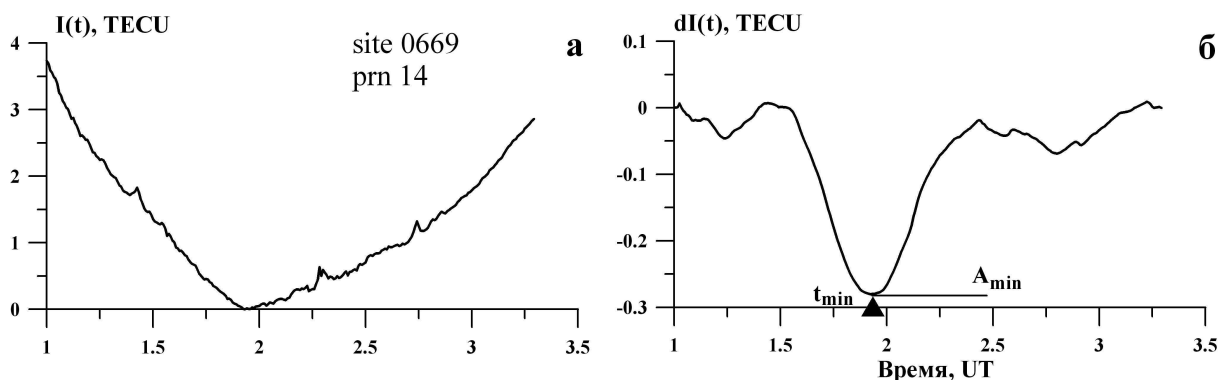


Рис. 1. Пример обработки ряда ПЭС: на панели а – исходный ряд  $I(t)$ , на панели б – отфильтрованный ряд  $dI(t)$

На рис. 1а представлен пример исходного ряда ПЭС  $I(t)$  для станции 0669 и спутника prn 14. Соответствующий отфильтрованный ряд  $dI(t)$  показан на рис. 1б. Для каждого

ряда  $dI(t)$  определялись время регистрации минимума ПЭС  $t_{\min}$  и его величина  $A_{\min}$ . Рассчитывались также величина максимальной фазы  $\Phi_m$  и время её наступления  $T_m$  для положения ионосферной точки, в которой достигался минимум вариаций ПЭС  $A_{\min}$ . Под ионосферной точкой мы понимаем точку пересечения луча «приемник-ИСЗ» GPS с плоскостью на высоте 300 км. Как уже отмечалось во Введении, одной из основных характеристик регулярного ионосферного отклика является величина запаздывания  $\tau$  относительно максимальной фазы затмения. В нашем случае величину  $\tau$  мы определяли как разницу между временем регистрации минимума вариаций ПЭС  $t_{\min}$  и временем её наступления  $T_m$  в соответствующей точке.

### Результаты и их обсуждение

На рис. 2а дана зависимость запаздывания  $\tau$  минимума вариаций ПЭС по отношению к моменту времени  $T_m$  от максимальной наблюдаемой фазы затмения  $\Phi_m$ . Зависимость амплитуды минимума вариаций ПЭС  $A_{\min}$  от  $\Phi_m$  представлена на рис. 2б. Значение  $\Phi_m = 1$  соответствует полному затмению, 0 – полностью открытому диску Солнца.

Из рис. 2а видно, что при величине максимальной фазы  $\Phi_m$  от 1 до примерно 0,85 (слева от пунктирной линии) минимум вариаций ПЭС наступает почти одновременно с моментом максимальной фазы  $T_m$ . Соответствующие значения запаздывания  $\tau$  лежат в пределах  $\sim 0.1$  часа (6 мин). Имеется также тенденция к увеличению  $\tau$  с уменьшением максимальной фазы  $T_m$ . При этом амплитуда минимума  $A_{\min}$  почти линейно уменьшается примерно от -0,35 до -0,15 TECU (рис. 2б). Максимальная абсолютная амплитуда отклика ПЭС  $dI$  (-0,35 TECU) соответствует относительной амплитуде  $dI/I_0 \sim 4\%$ . Здесь  $I_0$  – абсолютная величина вертикального ПЭС, определенная из карты GIM [9].

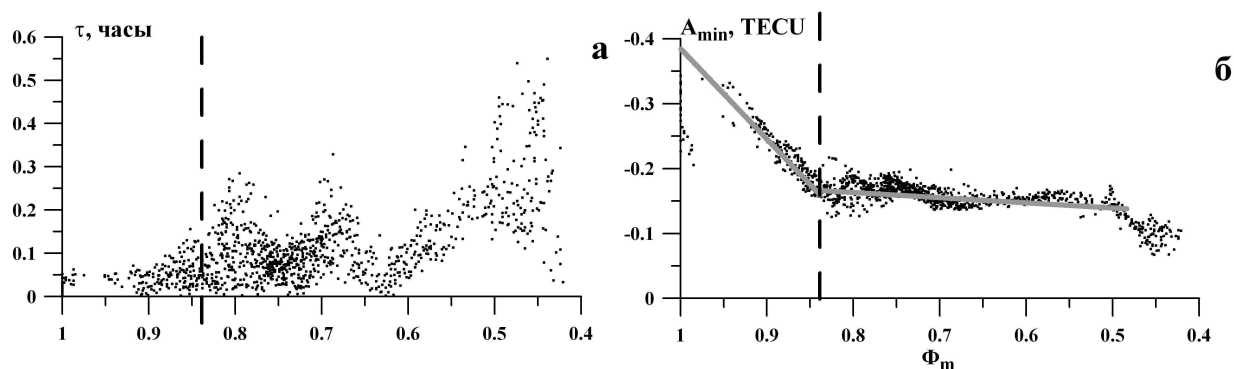


Рис. 2. Зависимости запаздывания минимума вариаций ПЭС  $\tau(\Phi_m)$  (панель а) и соответствующей амплитуды  $A_{\min}(\Phi_m)$  (панель б) от максимальной наблюдаемой фазы затмения

При величине максимальной фазы  $\Phi_m$  от 0,85 и меньше (справа от пунктирной линии) зависимость появления минимума вариаций ПЭС от момента максимальной фазы  $T_m$  сильно «размывается», хотя можно увидеть некий квазипериодический характер изменения запаздывания  $\tau$  от фазы  $\Phi_m$  (рис. 2а). Причем амплитуда минимума  $A_{\min}$  изменяется слабо, почти не зависит от величины  $\Phi_m$  и составляет примерно -0,15 TECU (рис. 2б). Можно отметить, что в зависимости  $A_{\min}(\Phi_m)$  также заметны квазипериодические изменения.

В данном случае об уверенном детектировании регулярного отклика на СЗ можно говорить только на достаточно близком расстоянии от траектории полной лунной тени (при максимальной фазе больше  $\sim 0,85$ ). В этой «ближней зоне» отклик ПЭС регистрируется почти синфазно с максимальной фазой затмения (запаздывание не более 6 мин), а амплитуда отклика почти линейно уменьшается примерно от  $-0,4$  до  $-0,15$  TECU.

В «дальней зоне» (максимальная фаза меньше  $\sim 0,85$ ) амплитуда отклика падает до  $-0,25$  TECU, что близко к амплитуде фоновых вариаций ПЭС для диапазона периодов 30-60 мин (диапазон фильтрации исходных данных) [10]. Вероятно, это и приводит к «размыванию» зависимости  $\tau(\Phi_m)$  и «выполаживанию»  $A_{\min}(\Phi_m)$ .

Полученные значения запаздывания  $\tau$  и амплитуды отклика  $A_{\min}$  в «ближней зоне» (максимальная фаза  $\Phi_m$  больше  $\sim 0,85$ ) близки к соответствующим значениям отклика ПЭС на затмение, наблюдавшееся 11 августа 1999 г. в Европе [6].

Стоит отметить наблюдающийся квазиволновой характер изменения зависимостей  $\tau(\Phi_m)$  и  $A_{\min}(\Phi_m)$  в «дальней зоне». По имеющимся данным довольно сложно судить о степени взаимосвязи этой особенности с прохождением лунной тени. Здесь требуется более детальное исследование пространственной картины возмущений ПЭС с привлечением данных других геофизических инструментов (в частности, ионозондов).

Мы выражаем благодарность Dr. D. Feng, Prof. S.G. Jin и Живетьеву И.В. за помощь в получении данных. Мы также благодарны сети GEONET за предоставленные данные GPS. Работа поддержана Фундаментальной исследовательской программой физического отделения РАН (Проект IV.12 «Современные проблемы радиофизики»), грантами РФФИ 08-05-00274-а и 10-05-00113-а.

## Литература

1. *Boitman O.N., Kalikhman A.D., Tashchilin A.V.* The midlatitude ionosphere during the total solar eclipse of March 9, 1997 // *J. Geophys. Res.*, 1999. V. 104. N A12. P. 28197-28206.
2. *Rishbeth H.* Solar eclipses and ionospheric theory // *Space Sci. Rev.*, 1968. V. 8. N 6. P. 543-554.
3. *Cohen E.A.* The study of the effect of solar eclipses on the ionosphere based on satellite beacon observations // *Radio Science*, 1984. V. 19. N 5. P. 769-777.
4. *Datta S., Bandyopadhyay P., Datta R.N.* Ionospheric observations on the F-region during the solar eclipse of 19 April 1958 // *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1959. V. 16. N 1/2. P. 182-185.
5. *Черкашин Ю.Н., Агафонников Ю.М.* Эффекты солнечного затмения 11 августа 1999 г. в распространении декаметровых радиоволн на среднеширотных радиотрассах различной протяженности // *Геомагнетизм и аэрономия*, 2001. Т. 41. № 5. С. 677-684.
6. *Afraimovich E.L., Kosogorov E.A., Lesyuta O.S.* Ionospheric effects of the August 11, 1999 total solar eclipse as deduced from European GPS network data // *Adv. Space Res.*, 2001. V. 27. N 6-7. P. 1351-1354.
7. *Afraimovich E.L., Palamarchouk K.S., Perevalova N.P.* GPS radio interferometry of traveling ionospheric disturbances // *J. Atm. Solar-Terr. Phys.*, 1998. V. 60. P. 1205-1223.
8. *Астрономический ежегодник на 2006 год.* Под ред. Глебовой Н.И., Лукашевой М.В., Свешникова М.Л., Скрипченко В.И. // Санкт-Петербург: Изд-во Института прикладной астрономии РАН, 2005. 706 с.
9. *Mannucci A.J., Ho C.M., Lindqwister U.J.* A global mapping technique for GPS-driven ionospheric TEC measurements // *Radio Science*, 1998. V. 33. N 8. P. 565-582.
10. *Afraimovich E.L., Kosogorov E.A., Lesyuta O.S., Ushakov I.I., Yakovets A.F.* Geomagnetic control of the spectrum of traveling ionospheric disturbances based on data from a global GPS network // *Ann. Geophys.*, 2001. V. 19. N 7. P. 723-731.

# **Ionosphere effects of total solar eclipse of July 22, 2009 as deduced from Japanese dense GPS network (GEONET) data**

**E.L. Afraimovich, S.V. Voeykov, I.K. Edemskiy**

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Russia, 664033, Irkutsk, p/o box 291, Lermontov st. 126a  
E-mail: serg3108@iszf.irk.ru*

This paper presents analysis results of typical ionosphere response on total solar eclipse (SE) of July 22, 2009 by total electron content data from dense GPS network in Japan (network GEONET with more that 1200 sites). Good registration of SE response was possible only at short distances from total eclipse region, where value of maximum eclipse phase exceeds 85%. Value of delay between maximum SE phase observation and TEC response minimum registration does not exceed 6 min. Response amplitude decreases almost linear from -0.35 to -0.15 TECU with increasing of distance to total eclipse region.

**Keywords:** ionosphere disturbances, solar eclipse, total electron content, GPS.