

УДК 551.510.535

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ
ВСПЫШЕК ПО ДАННЫМ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ GPS/ГЛОНАСС**

А.М. Падохин, В.Е. Куницын, И.А. Нестеров

**DETERMINATION OF INTENSITY OF SOLAR FLARE IONIZING RADIATION FROM THE DATA
OF GPS/GLONASS NAVIGATION SYSTEMS**

A.M. Padokhin, V.E. Kunitsyn, I.A. Nesterov

Проведено исследование внезапных увеличений электронной концентрации (SITEC) в ионосфере по данным системы GPS для нескольких значительных солнечных вспышек. Показана возможность детектирования солнечных вспышек с помощью системы GPS. Предложен метод определения эффективной ионизирующей интенсивности солнечного излучения во время вспышки по данным о скорости изменения полного электронного содержания.

In this work we studied the GPS measured SITEC (Sudden Increase of Total Electron Content) for several significant Solar flares and showed the possibility to detect Solar flares by GPS measurements. A new method for the determination of effective ionization intensity of Solar radiation from the speed of TEC variation was suggested.

Внезапные ионосферные возмущения возникают в результате воздействия излучения солнечной вспышки на верхние слои атмосферы. Во время вспышки Солнце представляет собой мощный источник рентгеновского и ультрафиолетового излучения, а также потока частиц с широким спектром энергий. Увеличение интенсивности рентгеновского и ультрафиолетового излучения, наблюдаемое во время хромосферных вспышек, немедленно вызывает возрастание полного электронного содержания в ионосфере (SITEC) [1,2].

Широкая сеть приемников сигналов систем GPS/ГЛОНАСС, расположенных по всему миру, позволяет оперативно получать информацию о TEC с временным разрешением, достаточным для исследований изменений электронной концентрации, вызванных быстрыми процессами, протекающими на Солнце во время вспышек [3–7]. В работе предложен метод оценки ионизирующего излучения Солнца во время вспышки по данным об изменении TEC с приемников сигналов GPS/ГЛОНАСС.

Для оценки ионосферного эффекта быстрого увеличения потоков солнечного рентгеновского и ультрафиолетового излучения во время солнечных вспышек анализировались данные о TEC и скорости изменения TEC с временным разрешением 30 с, полученные с приемников сети IGS, расположенных на дневной стороне Земли. Использовались данные со спутников, расположенных вблизи зенита для данной точки наблюдения, так как спутники с малыми углами возвышения не могут обеспечить точные измерения TEC.

Результаты обработки для вспышек 28.10.2003 (X17) на примере станции ДАКА (верхняя панель) и 4.11.2003 (X28) на примере станции ВЕМТ (нижняя панель) показаны на рис. 1. Для обеих вспышек (левые панели) видно внезапное увеличение TEC: на (20–30) TECU за 5 минут для вспышки 28.10.2003, что соответствует приблизительно 25 % увеличению ионосферного электронного содержания и на 7–8 TECU для вспышки 4.11.2003. Эффект внезапного увеличения электронного содержания еще более заметен на кривых скорости изменения TEC со временем (правые панели рис. 1). На примере зависимости для вспышки

28.10.2003 видно, что SITEC произошло около 11:03 UT и продолжалось порядка 10 мин. В это время скорость изменения TEC значительно возрастает до величин порядка 9 TECU/min и демонстрирует тонкую структуру с 2 максимумами в 11:03 UT и в 11:04:30 UT, что может быть связано с временной изменчивостью рентгеновского и ультрафиолетового излучения во время вспышки.

Данные о скорости изменения TEC во время солнечной вспышки могут быть использованы для оценки спектральной интенсивности потока солнечного излучения, вызванного вспышкой. Скорость изменения электронной концентрации в ионосфере задается уравнением:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = P + L, \tag{1}$$

где P и L – скорости образования и потерь электронов. Потоки солнечного излучения во время вспышки возрастают за время порядка нескольких минут, что меньше характерного времени процессов рекомбинации и дрейфа, что позволяет пренебречь потерей электронов. Если учесть также, что во время вспышки скорость образования электронов P испытывает скачок $P = P_0 + \Delta P \theta(t - t_0)$, то соответствующий скачок претерпевает и скорость изменения полного электронного содержания. Для атмосферы, состоящей из нескольких ионизируемых компонент, она может быть определена следующим образом:

$$\frac{\partial \text{TEC}}{\partial t} = \theta(t - t_0) \sum_{\lambda} \sum_i \frac{\eta_i(\lambda) I_{\infty}(\lambda)}{\sec \chi} \times \left[1 - \exp \left\{ - \exp \left(\frac{h_{0i}}{H_i} \right) \right\} \right], \tag{2}$$

где $\eta_i(\lambda)$ – фотоионизационный выход для i -й газовой компоненты на длине волны λ ; H_i и h_{0i} – приведенная высота и высота максимума скорости ионизации i -й газовой компоненты при нахождении Солнца в зените; $I_{\infty}(\lambda)$ – интенсивность солнечного излучения на длине волны λ на верхней границе атмосферы. При характерном значении соответствующих высот в ионосфере Земли вторым членом в

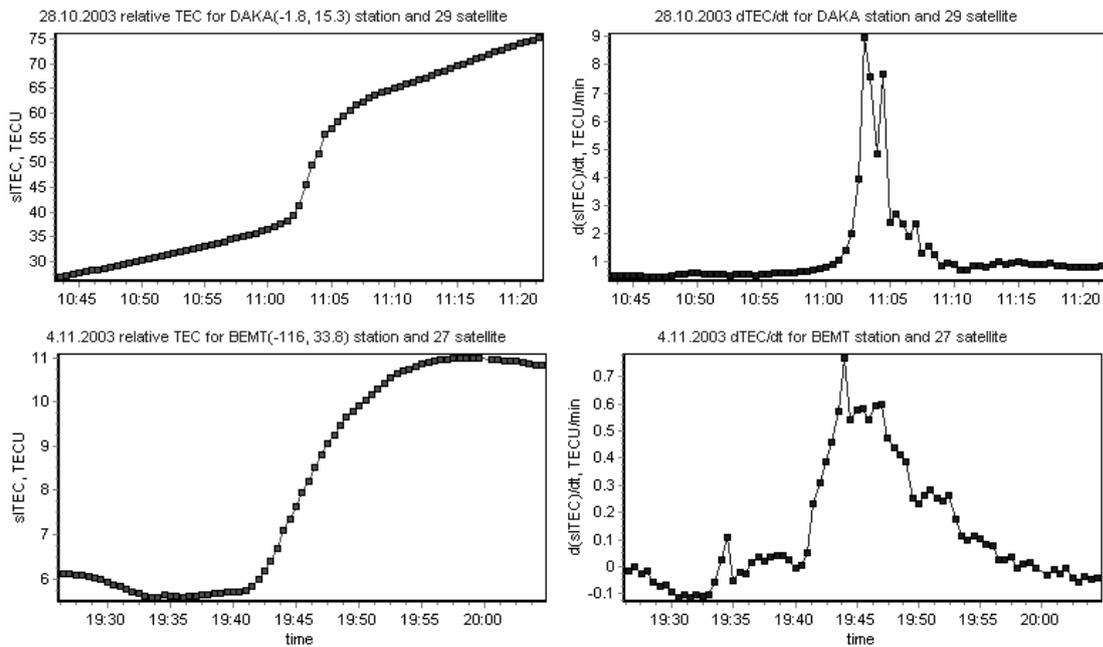


Рис. 1. Относительное ТЕС и скорость изменения ТЕС для пар спутник GPS– приемник GPS в периоды интенсивных солнечных вспышек 28 октября (верхняя панель) и 4 ноября 2003г. (нижняя панель)

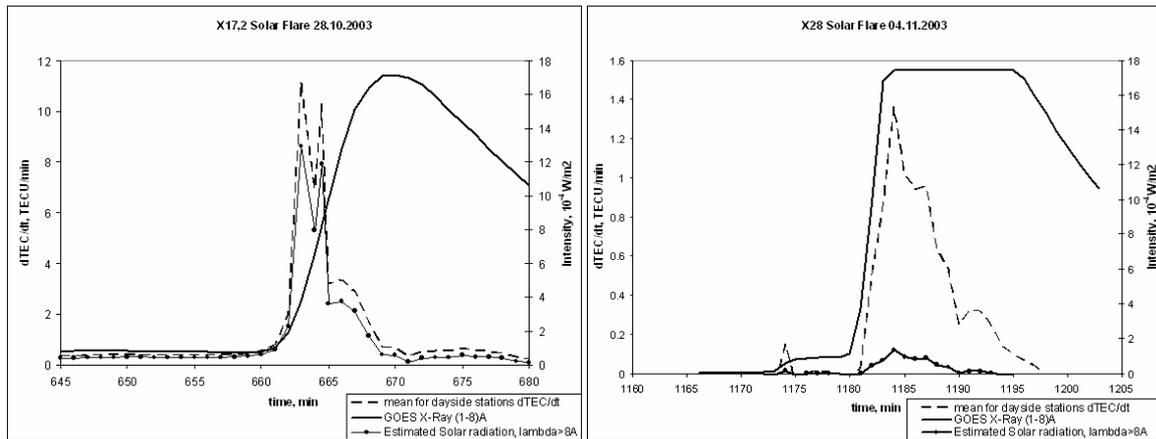


Рис. 2. Совместный график среднего по всем станциям дневной стороны Земли $dTEC/dt$, интенсивности рентгеновского излучения по данным GOES и оцененной по этим данным интенсивности солнечного излучения в диапазоне $\lambda > 8\text{Å}$ во время вспышек 28.10.2003 (левая панель) и 04.11.2003 (правая панель).

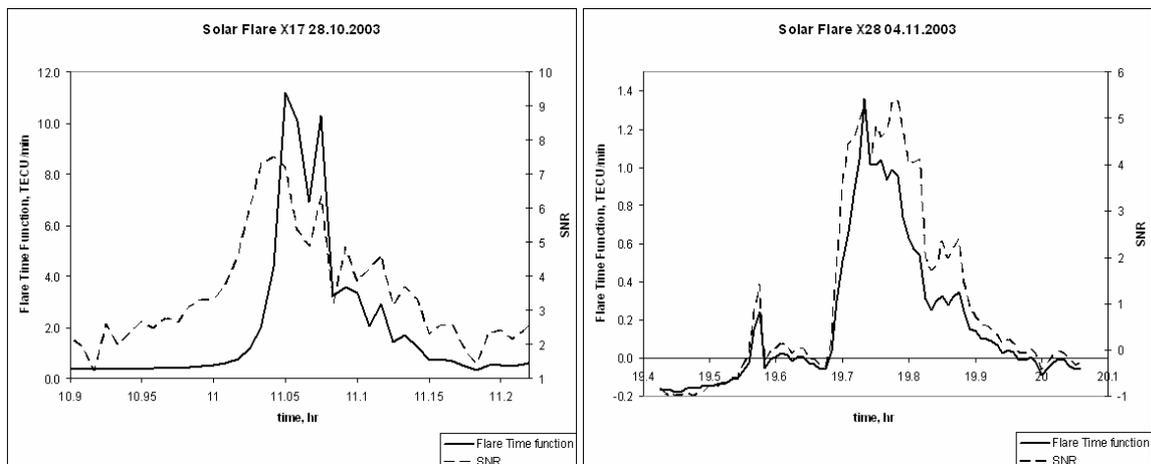


Рис. 3. Среднее по всем станциям дневной стороны Земли $dTEC/dt$ и соотношение «сигнал – шум» для вспышек 28.10.2003 (левая панель) и 04.11.2003 (правая панель).

квадратных скобках (2) можно пренебречь. Таким образом, можно ввести эффективную ионизиру-

щую интенсивность излучения при вспышке в интервале длин волн $\Delta\lambda$ как

$$\tilde{I} = \frac{\sum_{\lambda} \sum_i I_{\infty}(\lambda) \eta_i(\lambda)}{\sum_{\lambda} \sum_i \eta_i(\lambda)} = \frac{\left\langle \frac{\partial \text{TEC}}{\partial t} / \cos \chi \right\rangle}{\sum_{\lambda} \sum_i \eta_i(\lambda)}, \quad (3)$$

где $\left\langle \frac{\partial \text{TEC}}{\partial t} / \cos \chi \right\rangle$ – усредненное по всем станциям наблюдения, расположенным на дневной стороне Земли, значение скорости изменения электронной концентрации в ионосфере, приведенное к зенитному углу Солнца для каждой точки наблюдения.

Фотоионизационный выход для i -й газовой составляющей атмосферы может быть оценен следующим простейшим способом:

$$\begin{cases} \eta = \frac{\lambda}{hc}, & \lambda \leq \lambda_* \leftrightarrow V, \\ \eta = 0, & \lambda > \lambda_*, \end{cases} \quad (4)$$

$$\sum_{\lambda} \eta_i(\lambda) = \frac{1}{\Delta \lambda} \int_0^{\lambda_*} \frac{\lambda d\lambda}{hc} = \frac{\lambda_*^2}{2hc\Delta \lambda},$$

где λ_* – длина волны, соответствующая потенциалу ионизации V i -й газовой составляющей атмосферы, $\Delta \lambda$ – диапазон длин волн ионизирующих атмосферные газы (<1376 Е – порог ионизации NO). Тогда из (3) можно получить количественные характеристики потока ионизирующего солнечного излучения во время вспышки по наблюдениям SITEC. Рассмотренная методика позволяет также по наблюдениям $\left\langle \frac{\partial \text{TEC}}{\partial t} / \cos \chi \right\rangle$ со станций сети IGS на дневной стороне Земли и интенсивности ионизирующего солнечного излучения во время вспышки в определенном диапазоне длин волн (например, наблюдениям спутников серии GOES [8] для длин волн 1–8Е) оценивать интенсивность ионизирующего солнечного излучения вне этого диапазона следующим образом. Из (3) получаем:

$$I_{\lambda > 8\text{Å}} = \left(\left\langle \frac{\partial \text{TEC}}{\partial t} / \cos \chi \right\rangle - \eta_{\lambda < 8\text{Å}} I_{\lambda < 8\text{Å}} \right) / (\eta_{\lambda > 8\text{Å}}), \quad (5)$$

где $I_{\lambda > 8\text{Å}}$ – интенсивность ионизирующего излучения в диапазоне больше 8 Е, $I_{\lambda < 8\text{Å}}$ – интенсивность жесткого рентгеновского излучения, измерения которой проводятся на спутниках серии GOES; $\eta_{\lambda > 8\text{Å}}$ и $\eta_{\lambda < 8\text{Å}}$ – фотоионизационные выходы для соответствующих спектральных интервалов, могут быть оценены аналогично (4).

Результаты такой оценки для вспышек 28.10.2003 и 04.11.2003 представлены на рис. 2. Видно, что, несмотря на то, что вспышка 04.11.2003 была более интенсивной в рентгеновском диапазоне по сравнению с вспышкой 28.10.2003, интенсивность ионизирующего излучения на больших длинах волн, а также вариации ТЕС для нее в 5–6 раз меньше чем для вспышки 28.10.2003 г. Стоит отметить, что вспышка 04.11.2003 была лимбовой вспышкой. Для таких вспышек характерны сильное увеличение потока рентгеновского излучения и не столь значительное увеличение потока ультрафиолетового излучения Солнца.

Высокая повторяемость временного хода скорости изменения ТЕС во время вспышки от одной пары спутник GPS – приемная станция сети IGS к другой дает также возможность использовать величину $\left\langle \frac{\partial \text{TEC}}{\partial t} / \cos \chi \right\rangle$ для описания временной зависимости ионизирующего излучения Солнца во время вспышки [4], применяя определенный критерий для детектирования самой вспышки. На рис. 3 показаны временные зависимости $\left\langle \frac{\partial \text{TEC}}{\partial t} / \cos \chi \right\rangle$ для вспышек 28.10.2003 и 04.11.2003, а также соответствующие значения отношения сигнал – шум. Видно, что во время вспышки соотношение сигнал – шум возрастает. Определенное значение этой величины, например SNR=3, может быть выбрано как критерий детектирования вспышки.

В работе проведено исследование SITEC в ионосфере во время интенсивных солнечных вспышек 28.10.2003 и 04.11.2003 по данным системы GPS. Предложен критерий детектирования солнечных вспышек по данным системы GPS. Показано, что, несмотря на то, что вспышка 04.11.2003 была более интенсивной в рентгеновском диапазоне, SITEC, вызванное ей, в 5–6 раз меньше SITEC, вызванного вспышкой 28.10.2003, что связано с меньшей интенсивностью вспышки 04.11.2003 в ультрафиолетовом диапазоне. По данным о скорости изменения ТЕС со станций сети IGS и об интенсивности солнечного рентгеновского излучения в диапазоне 1–8 Е со спутников серии GOES проведены оценки интенсивности солнечного излучения вне диапазона 1–8 Е для вспышек 28.10.2003 и 04.11.2003. Предложенный метод может быть использован при изучении на основе данных сети приемников GPS внезапных ионосферных возмущений, вызванных солнечными вспышками.

Работа выполнена при поддержке фонда РФФИ, гранты 05-05-65145, 07-05-01120.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mendillo M., Klobuchar J.A., Fritz R.B., et al. // J. Geophys. Res. 1974. V. 79. P. 665.
2. Митра А. Воздействие солнечных вспышек на ионосферу Земли. М., 1977.
3. Afraimovich E.L., Altynsev A.T., Grechnev. V.V., Leonovich L.A. // Adv. Space Res. 2001. V. 27. P. 1333
4. Afraimovich E.L., Altynsev A.T., Kosogorov E.A. // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2001. 63. P 1841.
5. Wan W., Liu L., H., Yuan et al. // Adv. Space Res. 2005. V. 36. P. 2465.
6. Liu J. Y., Lin C.H., Chen Y.I. et. al. // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. A05308.
7. Liu J. Y., Lin C.H., Tsai H.F., Liou Y.A. // J. Geophys. Res., 2004. V. 109. A01307.
8. <http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/>

Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, Москва

