

УДК 551.510.535

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

В. Е. Куницын, А. М. Падохин

(кафедра физики атмосферы)

E-mail: kunitsyn@phys.msu.ru

Показана возможность детектирования солнечных вспышек с помощью систем GPS/ГЛОНАСС. Проведено исследование внезапных увеличений полного электронного содержания в ионосфере по данным системы GPS. Проанализирована зависимость вариаций полного электронного содержания от потоков ионизирующего солнечного ультрафиолетового и рентгеновского излучения. Предложен метод определения эффективной интенсивности ионизирующего солнечного излучения во время сильной вспышки по данным о скорости изменения полного электронного содержания.

Увеличение интенсивности рентгеновского и ультрафиолетового излучения, наблюдаемое во время хромосферных вспышек, проявляется в виде внезапных увеличений полного электронного содержания (SITEC) в ионосфере. Ранее основным методом исследования изменения полного электронного содержания во время солнечных вспышек являлся метод измерения фарадеевского вращения плоскости поляризации сигналов радиомаяков, установленных на геостационарных спутниках [1, 2]. В последнее время для исследования ионосферы активно используются навигационные системы типа GPS/ГЛОНАСС. Широкая сеть приемников сигналов этих систем, расположенных по всему миру, позволяет оперативно получать информацию о полном электронном содержании (ТЕС) с временным разрешением, достаточным для исследований изменений электронной концентрации, вызванных быстрыми процессами, протекающими на Солнце во время вспышек. В работах [3, 4] были проведены исследования зависимости SITEC от зенитного угла Солнца на примере солнечной вспышки 14 июля 2000 г., показано, что величина SITEC обратно пропорциональна функции Чэпмена зенитного угла Солнца [3]. Большое число солнечных вспышек различной интенсивности было исследовано в [5]. В рамках приближения простого слоя в [3] была предложена методика оценки ионизирующего излучения Солнца по данным об увеличении ТЕС во время вспышек. Приближение простого слоя лишь качественно описывает распределение электронов в ионосфере Земли, поэтому целесообразным представляется использование его обобщения на случай атмосферы состоящей из нескольких ионизируемых компонент, для определения ионизирующего излучения Солнца во время вспышки по данным об изменении ТЕС, что и предлагается в этой работе.

Одни из самых интенсивных солнечных вспышек

за всю историю наблюдений произошли в конце октября – начале ноября 2003 г. Вспышка 4 ноября 2003 г. (X28) была самой интенсивной по рентгеновскому излучению за всю историю наблюдений, также достаточно интенсивные вспышки произошли 28 октября 2003 г. (X17) и 29 октября 2003 г. (X10).

Для того чтобы исследовать SITEC, вызванное солнечной вспышкой, анализировались данные ТЕС с разрешением 30 с, полученные на международной сети приемников IGS, и данные о потоках солнечного ультрафиолетового и рентгеновского излучения со спутников GOES [6] и SOHO [7] с разрешением 60 и 15 с соответственно. На рис. 1 (вверху) показаны потоки солнечного излучения во время вспышки класса X17 28 октября 2003 г. Начиная с 11:03 UTC в течение 10 мин поток рентгеновского излучения вырос в 17 раз, поток в спектральном диапазоне 1–500 Å вырос более чем в полтора раза. На рис. 1 (внизу) показаны потоки солнечного излучения во время вспышки класса X28 4 ноября 2003 г. Отметим также, что измерительная аппаратура на спутнике GOES не дает возможности измерять потоки рентгеновского излучения с интенсивностью больше $1.8 \cdot 10^{-3}$ Вт/м². С этим связана область постоянного максимального значения интенсивности рентгеновского излучения для вспышки 4 ноября 2003 г. (см. рис. 1, внизу). Реальные потоки рентгеновского излучения для этой вспышки достигали $2.8 \cdot 10^{-3}$ Вт/м².

Для оценки ионосферного эффекта быстрого увеличения потоков солнечного рентгеновского и ультрафиолетового излучения анализировались данные о ТЕС и скорости изменения ТЕС 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

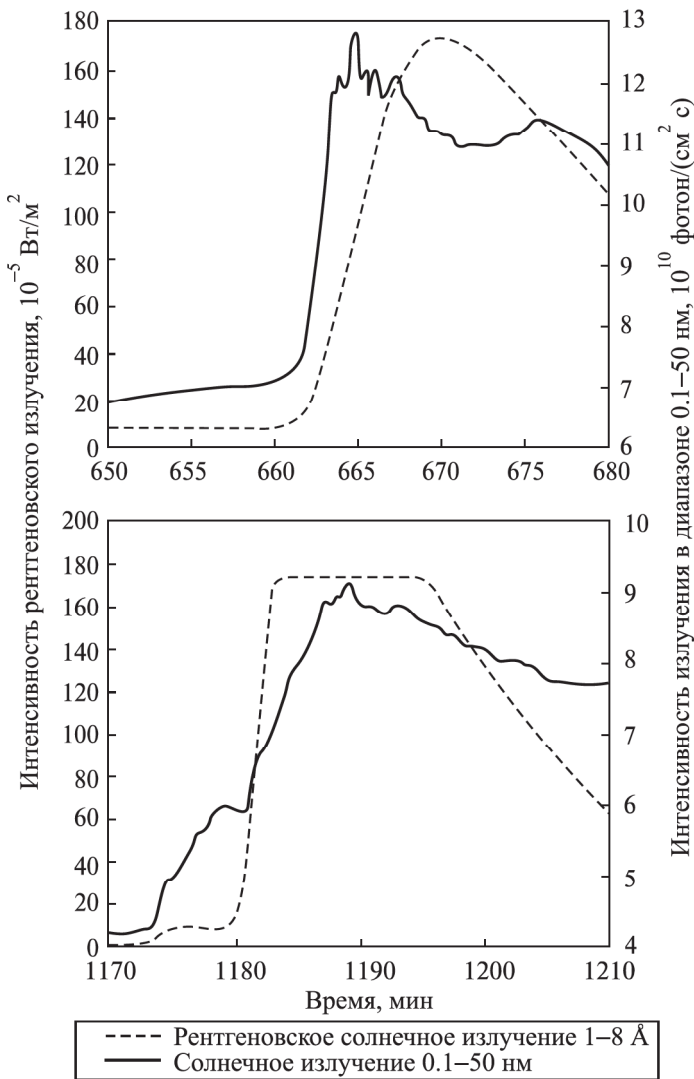


Рис. 1. Потоки солнечного излучения по данным ИСЗ SOHO и GOES-12 для вспышки 28 октября 2003 г. (вверху) и 4 ноября 2003 г. (внизу)

ТЕС. Таким образом, для каждой станции наблюдения вычислялись и пересчитывались на вертикаль наклонный ТЕС и производная $d\text{ТЕС}/dt$ для двух-трех пар спутник-приемник. Результаты обработки для вспышек 28.10.2003 г. на примере станции ДАКА (вверху) и 4.11.2003 г. на примере станции ВЕМТ (внизу) показаны на рис. 2. Для обеих вспышек (слева) видно внезапное увеличение ТЕС: на 20–30 ТЕСУ за 5 мин для вспышки 28.10.2003 г., что соответствует приблизительно 25%-му увеличению ионосферного электронного содержания и на 7-8 ТЕСУ для вспышки 4.11.2003 г. Эффект внезапного увеличения электронного содержания еще более заметен на кривых скорости изменения ТЕС со временем (рис. 2, справа). На примере зависимости для вспышки 28.10.2003 г. видно, что SITEC произошло около 11:03 UT и продолжалось порядка 10 мин. В это время скорость изменения ТЕС значительно возрастает до величин порядка 9 ТЕСУ/мин и демонстрирует тонкую структуру с двумя 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. Для анализа этой связи был построен совместный график временных зависимостей солнечного потока в спектральном диапазоне 1–500 Å и скорости изменения ТЕС. Эти зависимости представлены на рис. 3. Видно совпадение структуры временной зависимости $d\text{ТЕС}/dt$ и солнечного потока. Несмотря на то что вспышка 4.11.2003 г. была более интенсивной в рентгеновском и жестком ультрафиолетовом диапазоне, SITEC, вызванный ею, в 2–3 раза меньше, чем для вспышки 28.10.2003 г., что может быть объяснено влиянием излучения в мягком ультрафиолетовом диапазоне ($> 500 \text{ Å}$), прямые измерения в котором отсутствуют.

Данные о скорости изменения ТЕС во время солнечной вспышки могут быть использованы для оценки спектральной интенсивности потока солнечного излучения, вызванного вспышкой.

Скорость изменения электронной концентрации в ионосфере задается уравнением неразрывности с источниками и стоками в правой части

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \text{div } N\nu = P - L, \quad (1)$$

где P — скорость образования, а L — скорость потерь электронов. Как видно из рис. 1, потоки солнечного излучения во время вспышки резко возрастают за время порядка нескольких минут, что меньше характерного времени процессов рекомбинации и дрейфа, тогда на масштабе коротких периодов (1) можно переписать в виде

$$\frac{\partial N}{\partial t} = P. \quad (2)$$

В соответствии с данным приближением во время вспышки интенсивность ионизирующего солнечного излучения возрастает скачкообразно: $I = I_0 + \Delta I\theta(t - t_0)$, вследствие чего скорость образования электронов P испытывает скачок: $P = P_0 + \Delta P\theta(t - t_0)$, и соответствующий скачок претерпевает производная электронной концентрации, а следовательно, и производная полного электронного содержания ТЕС:

$$\frac{\partial \text{ТЕС}}{\partial t} = \int_0^\infty \Delta P(h) dh \theta(t - t_0). \quad (3)$$

Для скорости фотоионизации излучением с широким спектром для изотермической атмосферы, состоящей из нескольких компонент, справедливо

$$P = \sum_\lambda \sum_i \eta_i(\lambda) A_i(\lambda) I_\infty(\lambda) \rho_{oi} \times \exp \left\{ -\frac{h}{H_i} - A_i(\lambda) \rho_{oi} H_i e^{-h/H_i} \sec \chi \right\}, \quad (4)$$

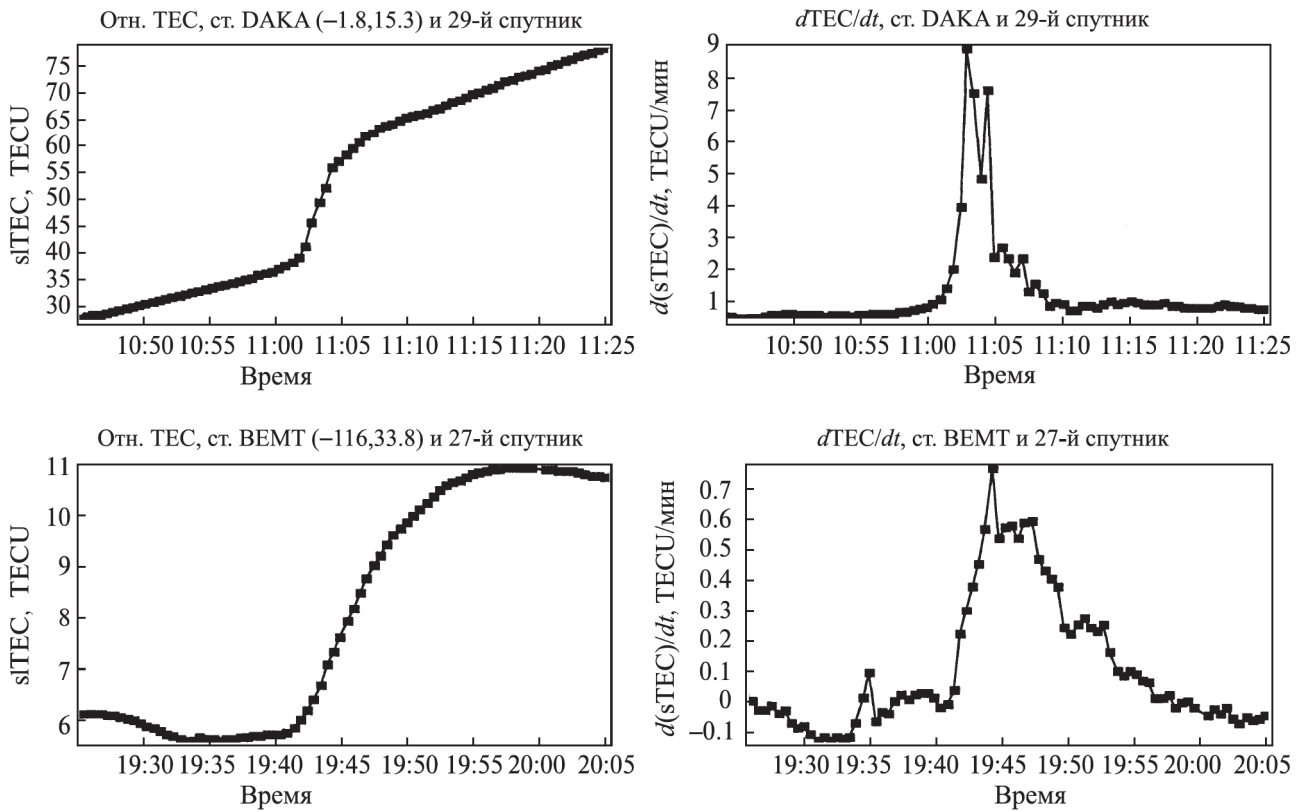


Рис. 2. Относительный TEC и скорость изменения TEC для пар спутник GPS – приемник GPS в периоды интенсивных солнечных вспышек 28 октября 2003 г. (вверху) и 4 ноября 2003 г. (внизу)

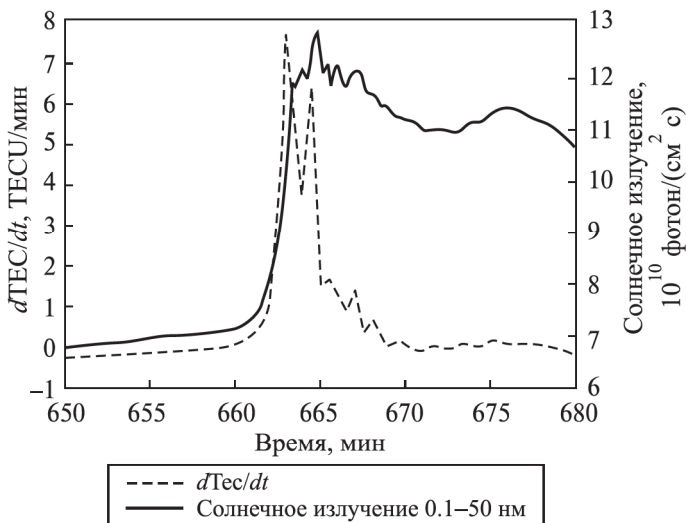


Рис. 3. Поток солнечного излучения 1–500 Å и скорость изменения TEC на станции DAKA для 5-го спутника 28.10.2003 г.

где $\eta_i(\lambda)$ — фотоионизационный выход для i -й газовой компоненты на длине волны λ ; $A_i(\lambda)$ — сечение поглощения i -й газовой компоненты на длине волны λ ; H_i и ρ_{oi} — приведенная высота и приземная плотность i -й газовой компоненты соответственно; $I_\infty(\lambda)$ — интенсивность солнечного излучения на длине волны λ на верхней границе атмосферы. Тогда после интегрирования (3) получим

$$\frac{\partial \text{TEC}}{\partial t} = \theta(t - t_0) \sum_{\lambda} \sum_i \frac{\eta_i(\lambda) \Delta I_\infty(\lambda)}{\sec \chi} \times \left[1 - \exp \left\{ - \exp \left(\frac{h_{oi}}{H_i} \right) \right\} \right], \quad (5)$$

где h_{oi} — высота максимума скорости ионизации i -й газовой компоненты при нахождении Солнца в зените. При характерном значении соответствующих высот в ионосфере Земли вторым членом в квадратных скобках (5) можно пренебречь.

Введем эффективную ионизирующую интенсивность солнечного излучения при вспышке в интервале длин волн $\Delta\lambda$ как

$$\tilde{I} = \frac{\sum_{\lambda} \sum_i I_\infty(\lambda) \eta_i(\lambda)}{\sum_{\lambda} \sum_i \eta_i(\lambda)}.$$

Тогда можно получать количественные характеристики потока ионизирующего солнечного излучения во время вспышки по наблюдениям SITEC.

Отметим, что предложенная методика позволяет определять эффективную интенсивность ионизирующего солнечного излучения во время вспышки во всем интервале длин волн, ионизирующих атмосферу Земли, а не только в узких спектральных диапазонах, измерения в которых производятся на искусственных спутниках Земли.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 05-05-65145, 07-05-01120).

Литература

1. *Mendillo M., Klobuchar J.A., Fritz R.B.* et al. // J. Geophys. Res. 1974. **79**. P. 665.
2. *Митра А.* Воздействие солнечных вспышек на ионосферу Земли, М., 1977.
3. *Wan W., Liu L., Yuan H.* et al. // Advances in Space Res. 2005. **36**. P. 2465.
4. *Liu J.Y., Lin C.H., Chen Y.I.* et. al. // J. Geophys. Res. 2006. **111**. P. A05308.
5. *Liu J.Y., Lin C.H., Tsai H.F., Liou Y.A.* // J. Geophys. Res. 2004. **109**. P. A01307.
6. <http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/>.
7. http://www.usc.edu/dept/space_science/OLD_WEB/semdata.htm.

Поступила в редакцию
21.03.07