

## Влияние солнечных вспышек на ионизацию верхней атмосферы. Анализ ряда значительных событий 23-го и 24-го солнечных циклов

В. Е. Куницын<sup>а</sup>, М. О. Назаренко, И. А. Нестеров, А. М. Падохин<sup>б</sup>

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет,  
кафедра физики атмосферы. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

E-mail: <sup>а</sup> kunitsyn@physics.msu.ru, <sup>б</sup> padokhin@physics.msu.ru

Статья поступила 25.02.2015, подписана в печать 20.03.2015.

Проведено сравнение эффектов ионизации верхней атмосферы от ряда интенсивных солнечных вспышек X-класса 23-го и 24-го циклов солнечной активности по данным приема сигналов глобальных спутниковых навигационных систем GNSS (Global Navigational Satellite Systems) на станциях сети IGS (International GNSS Service). Развита методика оценки по данным GNSS геоэффективности солнечных вспышек. Предложено использовать среднее по всем станциям, расположенным на дневной стороне Земли, значение скорости изменения полного электронного содержания, приведенное к зенитному углу Солнца во время вспышки, как параметр, характеризующий геоэффективность вспышки.

*Ключевые слова:* солнечные вспышки, ионосфера, полное электронное содержание, глобальные спутниковые навигационные системы, радиотомография, рентгеновское и жесткое ультрафиолетовое излучение.

УДК: 551.510.413.5. PACS: 94.20.Vv.

### Введение

Одним из ярких проявлений солнечной активности являются солнечные вспышки [1]. Исследования влияния солнечных вспышек на околоземное космическое пространство и оболочки Земли [5–8] являются весьма актуальными и имеют большое прикладное значение для космических систем, навигации, радиолокации и связи. Задачей данной работы является исследование ионосферных эффектов солнечных вспышек и их влияния на сигналы спутниковых навигационных систем.

Во время хромосферной вспышки резко (на порядки) увеличивается интенсивность ионизирующего рентгеновского и жесткого ультрафиолетового излучения Солнца, что приводит к росту электронной концентрации в ионосфере Земли [2], различному для разных высот, а следовательно, и к росту полного электронного содержания ТЕС (Total Electron Content).

Первые глобальные наблюдения внезапных увеличений ТЕС, вызванных солнечными вспышками, были проведены в 1970-е гг. [9] с использованием радиомаяков на геостационарных спутниках и метода Фарадеевского вращения плоскости поляризации.

В последние десятилетия для исследования ионосферы активно используются глобальные навигационные спутниковые системы типа GPS/ГЛОНАСС. Комбинация фазовых измерений на паре когерентных частот гигагерцового диапазона позволяет оперативно получать информацию о ТЕС с временным разрешением, достаточным для исследований изменений электронной концентрации в ионосфере, вызванных быстрыми процессами, протекающими на Солнце во время вспышек [10–17, 22]. Широкая сеть GNSS-приемников, расположенных по всему миру, позволяет изучать ионосферные эффекты солнечных вспышек в планетарном масштабе. Кроме того, с появлением в орбитальных группировках

геостационарных систем дифференциальной коррекции SBAS (Satellite-Based Augmentation Systems) спутников, передающих сигналы, аналогичные по структуре сигналам GNSS, появилась возможность использовать их для исследований ионосферных эффектов солнечных вспышек аналогично сигналам GPS/ГЛОНАСС [21].

### 1. Ионосферные эффекты солнечных вспышек по данным GNSS

Фазовые данные  $L_1$  и  $L_2$  на двух рабочих частотах (для системы GPS  $f_1 = 1575.42$  МГц и  $f_2 = 1227.6$  МГц, для системы ГЛОНАСС 1600 и 1250 МГц соответственно) позволяют определить ТЕС вдоль траектории луча спутник–приемник  $l$  исходя из следующего простого соотношения [4]:

$$\text{TEC} = \int_l N_e(\mathbf{r}) dl = \left( \frac{L_1}{f_1} - \frac{L_2}{f_2} \right) \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \frac{c}{K} + \text{const}, \quad (1)$$

где  $K = 40.308 \text{ м}^3/\text{с}^2$ ,  $c$  — скорость света в вакууме,  $N_e(\mathbf{r})$  — распределение электронной концентрации в ионосфере. Вариации ТЕС во время вспышки, полученные со станций, расположенных на освещенной стороне Земли, позволяют исследовать ионосферные эффекты солнечных вспышек [10–18, 22, 23].

На рис. 1 приведены примеры обработки данных GPS с двух приемников сети IGS [24], находившихся на дневной стороне Земли в момент одной из значительных вспышек 23-го солнечного цикла, вспышки 14.07.2000 (класс X6, «вспышка Дня Бастилии»). Видно внезапное увеличение ТЕС на 1.5–2 TECU за 10 мин (1 TECU =  $10^{16} \text{ м}^{-2}$ ). Эффект внезапного увеличения электронного содержания (SITEC) еще более заметен на кривых скорости изменения ТЕС со временем (рис. 1, справа). Видно, что SITEC произошло около 10:15 UT и продолжалось порядка

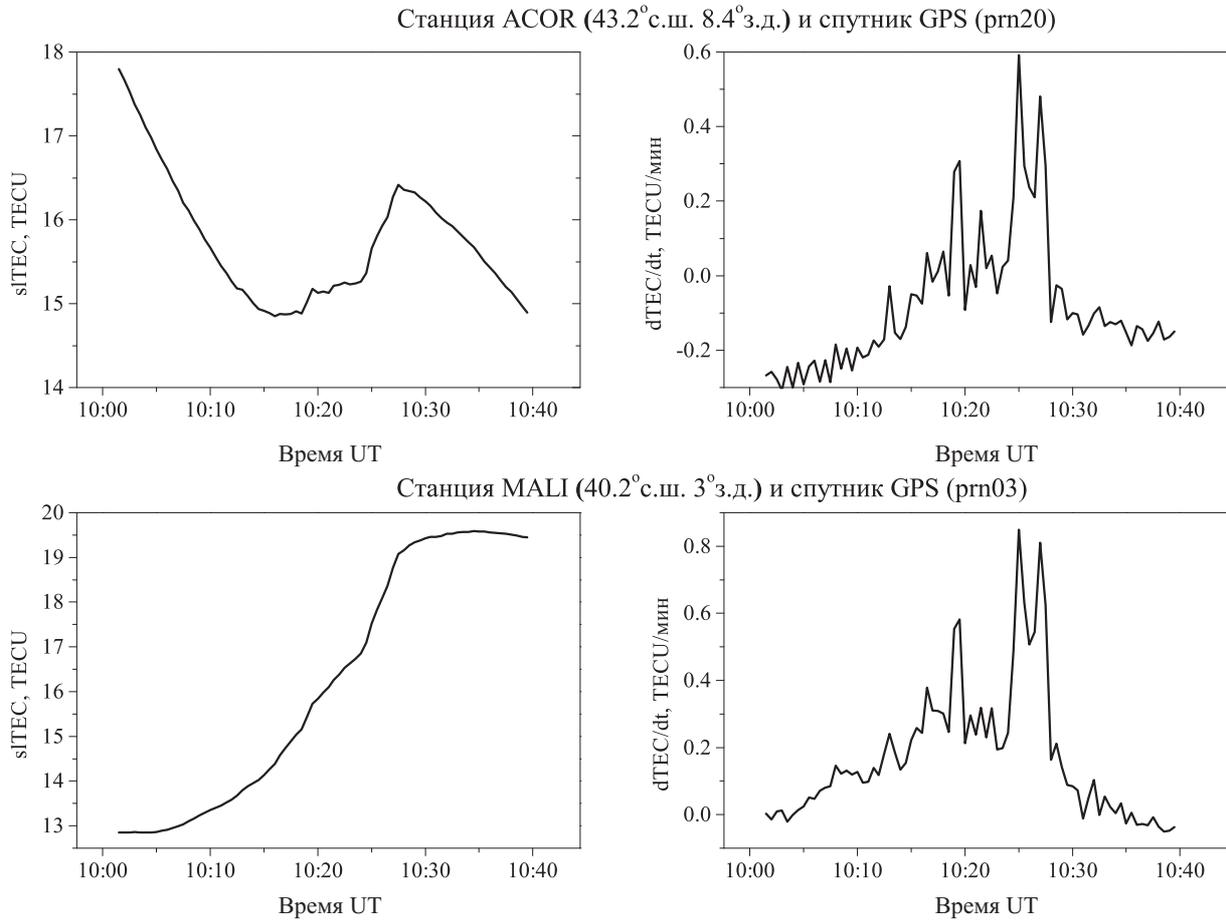


Рис. 1. Относительный ТЕС (слева) и скорость изменения ТЕС (справа) для двух пар спутник GPS — приемник GPS в период солнечной вспышки X6 14.07.2000

12 мин. В это время скорость изменения ТЕС значительно возрастает до величин порядка 1 TECU/мин и демонстрирует тонкую структуру с несколькими максимумами, что может быть связано с временной изменчивостью ионизирующего рентгеновского и ультрафиолетового излучения во время вспышки.

Отметим здесь также, что максимальные значения SITEC наблюдались при вспышке 28.10.2003 [14, 17] и достигали порядка 30 TECU при скорости изменения ТЕС более 10 TECU/мин, что соответствует ионосферной задержке порядка 5 м для частоты  $L_1$ . Это может привести к дополнительной ошибке позиционирования порядка 15 м для портативных одночастотных бытовых навигационных систем.

На рис. 1 можно также видеть подобие временных зависимостей скорости изменения ТЕС для различных точек наблюдения и спутников, для восходящих и нисходящих траекторий, что также подтверждает предположение о том, что временной ход скорости изменения ТЕС должен соответствовать временной изменчивости ионизирующего рентгеновского и жесткого ультрафиолетового излучения во время вспышки.

## 2. Оценка геоэффективности солнечных вспышек по данным GNSS

Данные о скорости изменения ТЕС во время солнечной вспышки могут быть использованы для оценки такого параметра, как эффективная интенсив-

ность ионизирующего солнечного излучения в интервале длин волн  $\Delta\lambda$ , вызванного вспышкой [17]:

$$\tilde{I} = \frac{\sum_{\lambda} \sum_i I_{\infty}(\lambda) \eta_i(\lambda)}{\sum_{\lambda} \sum_i \eta_i(\lambda)} = \frac{\langle \frac{\partial \text{TEC}}{\partial t} / \cos \chi \rangle}{\sum_{\lambda} \sum_i \eta_i(\lambda)}, \quad (2)$$

где  $\langle \frac{\partial \text{TEC}}{\partial t} / \cos \chi \rangle$  — усредненное по всем станциям наблюдения, расположенным на дневной стороне Земли, значение скорости изменения ТЕС в ионосфере, приведенное к зенитному углу Солнца  $\chi$  для каждой точки наблюдения;  $\eta_i(\lambda)$  — фотоионизационный выход (число пар ионов на единицу поглощенной энергии в единичном объеме атмосферы) для  $i$ -й газовой компоненты на длине волны  $\lambda$ ;  $I_{\infty}(\lambda)$  — интенсивность солнечного излучения на длине волны  $\lambda$  на верхней границе атмосферы. Данное выражение получено интегрированием уравнения неразрывности по высоте в предположении, что на временных масштабах характерных для вспышек можно пренебречь процессами рекомбинации и дрейфа, а для скорости фотоионизации  $P$  использовано выражение

$$P = \sum_{\lambda} \sum_i \eta_i(\lambda) A_i(\lambda) I_{\infty}(\lambda) \rho_{0i} \times \exp \left\{ -\frac{h}{H_i} - A_i(\lambda) \rho_{0i} H_i e^{-h/H_i} \sec \chi \right\}, \quad (3)$$

справедливое для фотоионизации излучением с широким спектром для изотермической атмосферы, со-

стоящей из нескольких газовых компонент [3], где  $A_i(\lambda)$  — сечение поглощения  $i$ -й газовой компоненты на длине волны  $\lambda$ ;  $H_i$  и  $\rho_{0i}$  — приведенная высота и приземная плотность  $i$ -й газовой компоненты.

Таким образом, можно видеть, что величина  $\langle \frac{\partial \text{TEC}}{\partial t} / \cos \chi \rangle$  может быть использована как характеристика геоэффективности солнечной вспышки в ионосфере [10–12, 17, 18, 23].

Приведем примеры зависимости  $\langle \frac{\partial \text{TEC}}{\partial t} / \cos \chi \rangle$  совместно с данными о рентгеновском излучении в диапазоне 0.1–0.8 нм по данным спутников GOES [25] для ряда вспышек X-класса 23-го и 24-го циклов солнечной активности (рис. 2, 3). Результаты для рассматриваемых вспышек сведены в таблицу.

Как видно из приведенных графиков, характерный временной масштаб, на котором происходит резкое увеличение ионизирующего солнечного излучения во время вспышки, составляет от 2 до 15 мин. Соответственно на таком же масштабе происходит резкий рост TEC в ионосфере на освещенной стороне Земли. Характерное увеличение TEC во время вспышек X-класса составляет единицы TECU, значения скорости изменения TEC порядка TECU/мин. Отдельно стоит вспышка 28.10.2003, для которой скачок TEC составил 20–30 TECU, а значения производной достигали значений больше 10 TECU/мин.

Вид временных зависимостей скорости изменения TEC во время вспышки меняется от вспышки к вспышке (см. рис. 2, 3). Наблюдались как зависимости с единственным максимумом (например, для вспышки 15.04.2001), так и более сложные зависимости с двумя (вспышка 28.10.2003) и более максимумами (например, вспышки 14.07.2000, 13.12.2006 и др.). Это связано с временной изменчивостью дополнительного потока ионизирующего солнечного излучения, вызванного вспышками.

Не всегда более мощная вспышка в рентгеновском диапазоне сопровождается большим внезапным увеличением TEC в ионосфере по сравнению с менее мощными в рентгеновском диапазоне вспыш-

ками. Например, вспышка класса X28 4.11.2003 (по некоторым данным, X45) вызвала ионосферный отклик, сопоставимый со вспышками класса X6 14.07.2000, X3 13.12.2006 и X18 02.04.2001 и меньший, чем ионосферный отклик при вспышках X17 28.10.2003 и X10 29.10.2003. Это свидетельствует о том, что основной вклад в ионизацию во время солнечных вспышек дает жесткое ультрафиолетовое излучение, эффективно ионизирующее область F ионосферы, а не рентгеновское излучение, эффективно ионизирующее области D и E. Таким образом, классификация мощности вспышек по рентгеновскому излучению не отражает величину ионосферных эффектов в F-области, вызываемых солнечными вспышками. Для детального их анализа необходимо привлечение данных о потоке жесткого ультрафиолетового излучения от Солнца во время вспышки.

С запуском геостационарных спутников GOES-13, GOES-14, GOES-15 появилась возможность одновременно с измерениями потока солнечного излучения в рентгеновском диапазоне проводить измерения потока солнечного излучения в жестком ультрафиолетовом диапазоне [25]. Таким образом, начиная с 2010 г. для интенсивных вспышек 24-го цикла мы имеем возможность сопоставить интенсивности излучения рентгеновского и жесткого ультрафиолетового диапазонов во время вспышек с ионосферным откликом  $\langle \frac{\partial \text{TEC}}{\partial t} / \cos \chi \rangle$ . Пример такого сопоставления для трех вспышек X-класса представлен на рис. 3. Обобщающие результаты также представлены в таблице.

Как хорошо видно, ионосферный отклик  $\langle \frac{\partial \text{TEC}}{\partial t} / \cos \chi \rangle$  больше соответствует интенсивности жесткого ультрафиолетового излучения в диапазоне 20–82 нм, эффективно ионизирующего F-область ионосферы, чем интенсивности вспышки в рентгеновском диапазоне 0.1–0.8 нм, эффективно ионизирующей области D и E ионосферы. Например, вспышки 9 августа и 8 марта 2011 г. отличаются по интенсивности рентгеновского излучения более чем

**Сравнительные характеристики геоэффективности ряда солнечных вспышек X-класса 23-го и 24-го циклов солнечной активности**

Дата	Группа пятен	Класс вспышки GOES X-Ray 0.1–0.8 нм	GOES EUV 20–82 нм, Вт/(м <sup>2</sup> ·нм)	$\langle \frac{\partial \text{TEC}}{\partial t} / \cos \chi \rangle$ , TECU/мин	Класс геомаг. бури
14.07.2000	9077	X6	—	0.98	G5
02.04.2001	9393	X18	—	1.1	G1
15.04.2001	9415	X16	—	0.75	G3
28.10.2003	10486	X17.2	—	11	G5
29.10.2003	10486	X10	—	4	G5
04.11.2003	10486	X28+	—	1.38	G2
13.12.2006	10930	X3.4	—	1.1	G4
15.02.2011	1158	X2.2	$4.5 \cdot 10^{-4}$	0.3	G1
09.03.2011	1166	X1.5	$5.5 \cdot 10^{-4}$	0.88	G2
09.08.2011	1263	X6.9	$5.6 \cdot 10^{-4}$	0.77	—
07.03.2012	1429	X5.4	$6.1 \cdot 10^{-4}$	0.97	G3

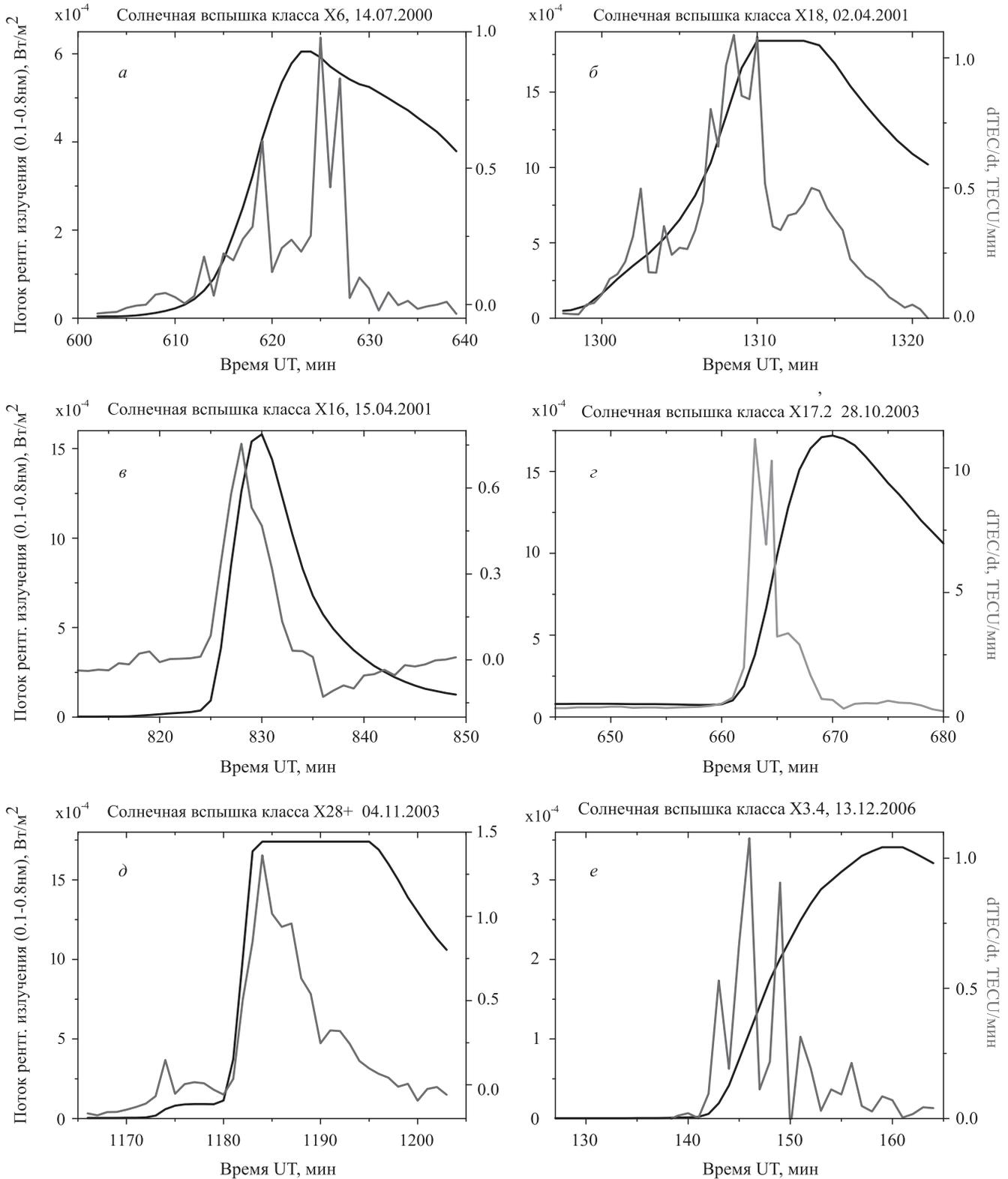


Рис. 2. Ионосферный отклик и интенсивность рентгеновского излучения для ряда вспышек X-класса 23-го цикла солнечной активности

в 4 раза при сравнимой интенсивности жесткого ультрафиолетового излучения, что вызывает сравнимый ионосферный отклик  $\langle \frac{\partial \text{TEC}}{\partial t} / \cos \chi \rangle$ . Отметим также, что интенсивность геомагнитных бурь, вызванных солнечными вспышками, в большей степени зависит от направления коронального выброса масс и положения источника вспышки на диске Солнца, чем от

интенсивности вспышки в рентгеновском и жестком ультрафиолетовом диапазонах. Отметим также, что, как показано в [12, 23], рассматриваемый параметр  $\langle \frac{\partial \text{TEC}}{\partial t} / \cos \chi \rangle$  также возможно использовать для исследования менее интенсивных вспышек M- и C-классов, что, однако, выходит за пределы настоящего исследования.

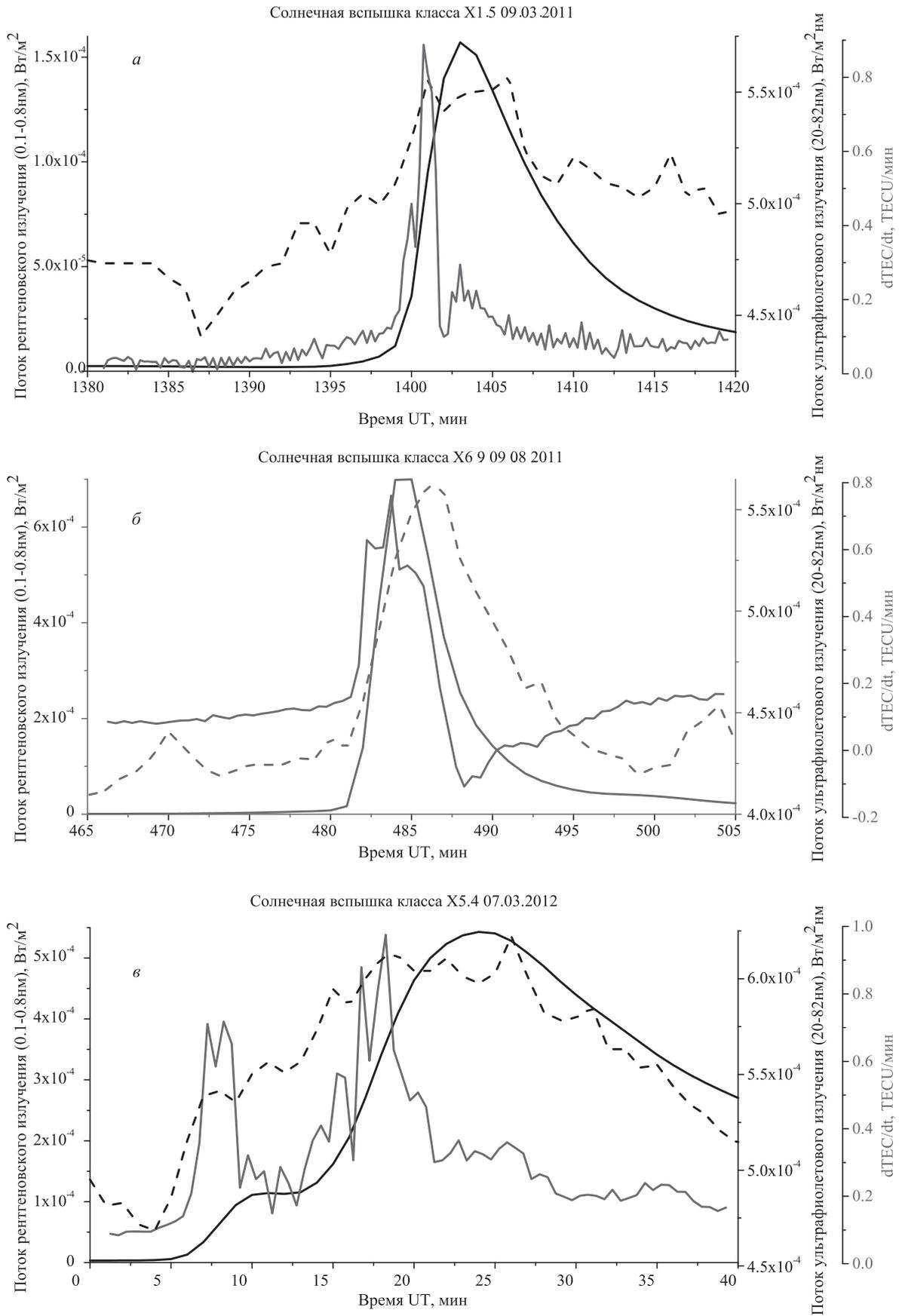


Рис. 3. Ионосферный отклик, интенсивность рентгеновского излучения (сплошная черная кривая) и жесткого ультрафиолетового излучения (пунктирная черная кривая) для ряда вспышек X-класса 24 го цикла солнечной активности

### 3. Радиотомографические исследования ионосферных эффектов солнечных вспышек

Еще одним методом исследования ионосферных эффектов солнечных вспышек в масштабе всего земного шара является высокоорбитальная радиотомография ионосферы [19, 20]. На рис. 4 показаны вариации глобального электронного содержания (по всей Земле) во время вспышек 28 и 29 октября 2003 г. по данным высокоорбитальной радиотомографии. Для сравнения приведены также вариации среднего ТЕС по данным глобальных ионосферных карт (GIM), представленным IGS, а также поток рентгеновского излучения в диапазоне 0.1–0.8 нм. Видно, что ТЕС, полученный томографическим методом, резко возрастает в момент вспышки, в то время как ТЕС по данным GIM IGS не обладает достаточным временным разрешением, чтобы описать быстрые процессы, происходящие в ионосфере во время солнечной вспышки. Здесь стоит отдельно подчеркнуть, что технология GIM широко используется за рубежом для анализа ионосферной погоды. Метод высокоорбитальной радиотомографии обладает лучшим временным и пространственным разрешением по сравнению с технологией GIM и позволяет получать более надежную информацию для исследований и мониторинга ионосферы как в спокойных условиях, так и в периоды сильных гелиогеофизических возмущений [18].

Приведем также сравнение данных, полученных во время вспышек методом высокоорбитальной радиотомографии, с данными ионозондов на примере вспышки 28.10.2003 и ионозонда в Афинах (рис. 5). Видно резкое повышение критической частоты слоя F2 в момент вспышки, связанное с резким ростом электронной концентрации под воздействием ионизирующего излучения вспышки. Отметим, что в момент вспышки у ионозонда происходит blackout и отсутствуют данные на протяжении 40 мин.

Эта картина достаточно типична для ионозондов в периоды сильных гелиогеофизических возмущений (магнитные бури, вспышки). В то же время

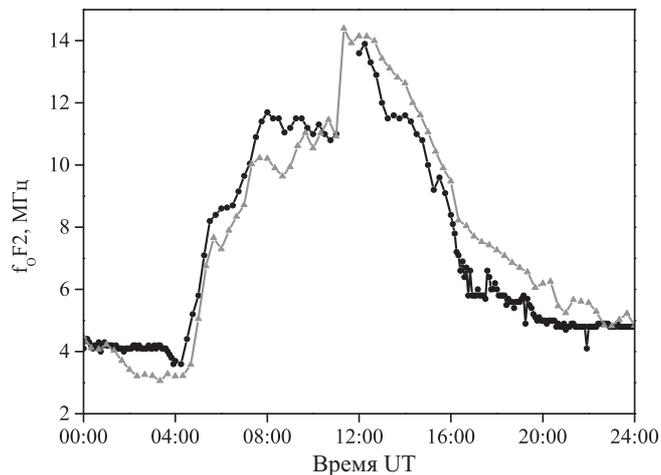


Рис. 5. Критическая частота слоя F2 во время вспышки X17 28.10.2003 по данным радиотомографии (серая кривая) и ионозонда в Афинах (черная кривая)

радиотомография позволяет получать данные и в эти временные интервалы, что является несомненным достоинством данного метода.

### Заключение

В работе проведено исследование внезапных увеличений электронной концентрации в верхней атмосфере по данным систем GNSS для ряда солнечных вспышек X-класса 23-го и 24-го цикла солнечной активности. Показана возможность детектирования солнечных вспышек с помощью систем GNSS. Развита методика оценки геоэффективности солнечных вспышек по данным о скорости изменения полного электронного содержания. Анализ ряда солнечных вспышек последних лет показал, что степень воздействия на ионосферу, определяемая вариациями ТЕС и скоростью изменения ТЕС, слабо связана с интенсивностью вспышки в рентгеновском диапазоне. Величины вариаций ионизации верхней атмосферы определяются главным образом величинами вариаций жесткого УФ-излучения Солнца, которые не всегда хорошо коррелируют с интенсивностью вспышки в рентгеновском диапазоне.

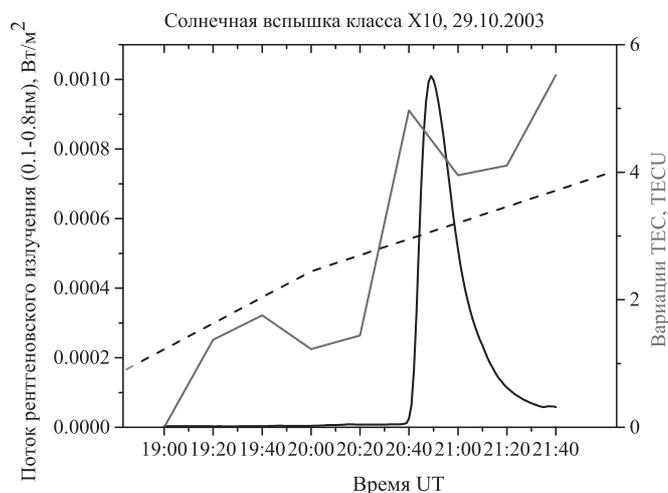
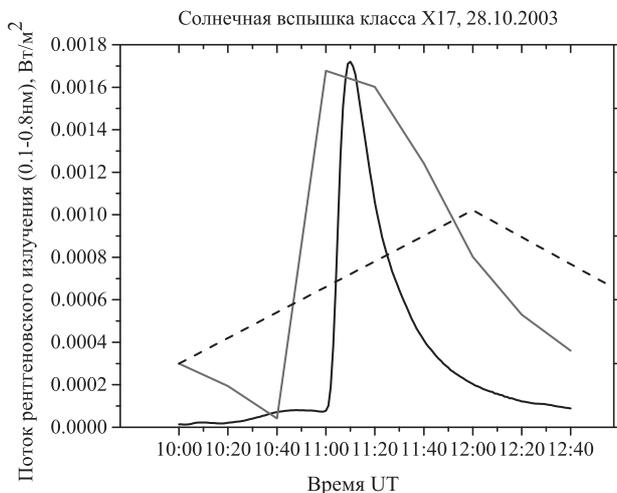


Рис. 4. Вариации ТЕС, интенсивность рентгеновского излучения для вспышек X17 28.10.2003 (слева) и X10 29.10.2003 (справа) по данным радиотомографии (сплошная серая кривая) и глобальных ионосферных карт IGS (пунктирная серая кривая)

Отметим также, что внезапные увеличения ТЕС во время вспышек в настоящее время не прогнозируются и не учитываются в ионосферных моделях, используемых для вычисления ионосферной поправки в системах спутниковой навигации, что может приводить к дополнительным ошибкам позиционирования одночастотных портативных бытовых навигационных систем, что обуславливает важность проведенных исследований для практических приложений.

Авторы благодарны IGS и NGDC за данные, использованные при подготовке статьи.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14-17-00637) в части радиотомографических исследований влияния солнечных вспышек и космической погоды, а также грантом Президента РФ (проект МК-2670.2014.5) в части анализа ионосферных эффектов солнечных вспышек по данным одиночных GNSS приемников.

### Список литературы

1. Somov B.V. Physical Processes in Solar Flares. Dordrecht; Boston; L., 1992.
2. Митра А. Воздействие солнечных вспышек на ионосферу Земли. М., 1977. (Mitra A.P. Ionospheric Effects of Solar Flares. Norwell, MA, 1974.)
3. Акасофу С.И., Чепмен С. Солнечно-земная физика. М., 1974. (Akasofu S.I., Chapman S. Solar-terrestrial Physics. Oxford, 1972.)
4. Hoffmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. Global Positioning System: Theory and Practice. N.Y.; Wien, 1992.
5. Мягкова И.Н., Кuznetsov S.N., Panasyuk M.I. et al. // Sun and Geosphere. 2006. **1**, N 2. P. 32.
6. Мягкова И.Н., Кuznetsov S.N., Kurt V.G. et al. // Advances in Space Research. 2007. **40**, N 12. P. 1929.
7. Мягкова И.Н., Баринова В.О., Бобровников С.Ю. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2013. № 5. С. 71. (Myagkova I.N., Barinova V.O., Bobrovnikov S.Yu. et al. // Moscow University Phys. Bull. 2013. **68**, N 5. P. 411.)
8. Krauss S., Fichtinger B., Lammer H. et al. // Ann. Geophys. 2012. **30**, N 8. P. 1129.
9. Mendillo M., Klobuchar J.A. et al. // J. Geophys. Res. 1974. **79**. P. 665.
10. Afraimovich E.L. // Radio Science. 2000. **35**, N 6. P. 1417.
11. Afraimovich E.L., Kosogorov E.A., Leonovich L.A. // Earth Planets Space. 2000. **52**. P. 1077.
12. Afraimovich E.L., Altyntsev A.T., Grechnev V.V., Leonovich L.A. // Ann. Geophys. 2002. **45**, N 1. P. 31.
13. Wan W., Liu L. et al. // Advances in Space Research. 2005. **36**. P. 2465.
14. Tsurutani B.T., Judge D.L., Guarnieri F.L. et al. // Geophys. Res. Lett. 2005. **32**. L03S09.
15. Liu J.Y., Lin C.H. et al. // J. Geophys. Res. 2006. **111**. A05308.
16. Liu J.Y., Lin C.H. et al. // J. Geophys. Res. 2004. **109**. A01307.
17. Куницын В.Е., Падохин А.М. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2007. № 5. С. 68. (Kunitsyn V.E., Padokhin A.M. // Moscow University Phys. Bull. 2007. **62**, N 5. P. 334.)
18. Kunitsyn V.E., Nesterov I.A., Padokhin A.M. // Proc. of the 11th IET International Conference on Ionospheric Radio Systems and Techniques (IRST-2009). Edinburgh, Scotland, 2009. P. 250.
19. Куницын В.Е., Нестеров И.А., Падохин А.М., Туманова Ю.С. // Радиотехника и электроника. 2011. **56**, № 11. С. 1285. (Kunitsyn V.E., Nesterov I.A., Padokhin A.M., Tumanova Yu.S. // J. Commun. Technol. and Electronics. 2011. **56**, N 11. P. 1269.)
20. Nesterov I.A., Kunitsyn V.E. // Adv. in Space Research. 2011. **47**, N 10. P. 1789.
21. Kunitsyn V., Kurbatov G., Yasyukevich Yu., Padokhin A. // IEEE Geoscience and Remote Sensing Lett. 2015. **12**, N 3. P. 547.
22. Смирнов В.М., Смирнова Е.В. // Геомагнетизм и аэронавигация. 2014. **54**, № 1. С. 94. (Smirnov V.M., Smirnova E.V. // Geomagnetism and Aeronomy. 2014. **54**, N 1. P. 87.)
23. Ясюкевич Ю.В., Воейков С.В. и др. // Космич. исслед. 2013. **51**, № 2. С. 125. (Yasyukevich Yu.V., Voeikov S.V. et al. // Cosmic Research. 2013. **51**, N 2. P. 114.)
24. <http://igs.org/>
25. <http://www.ngdc.noaa.gov/goes/sem/>

#### Solar flare forcing on ionization of upper atmosphere.

#### Comparative study of several major X-class events of 23rd and 24th solar cycles

V. E. Kunitsyn<sup>a</sup>, M. O. Nazarenko, I. A. Nesterov, A. M. Padokhin<sup>b</sup>

Department of Physics of Atmosphere, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.

E-mail: <sup>a</sup> [kunitsyn@physics.msu.ru](mailto:kunitsyn@physics.msu.ru), <sup>b</sup> [padokhin@physics.msu.ru](mailto:padokhin@physics.msu.ru).

By analyzing the GNSS (Global Navigational Satellite Systems) signals recorded at the IGS (International GNSS Service) network, we compare the effects of ionization of the upper atmosphere by a series of intense X-class solar flares during the 23rd and 24th solar cycles. We develop the methods for estimating the geo-effectiveness of solar flares from the GNSS data and suggest using the rate of change of the ionospheric total electron content averaged over all the receiving stations located on the sunlit side of the Earth reduced to the solar zenith angle during the flare as the characteristic of the flare's geo-effectiveness.

**Keywords:** solar flares, ionosphere, total electron content, GNSS, radio tomography, X-ray and EUV radiation.

PACS: 94.20.Vv.

Received 25 February 2015.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 4(2015).

#### Сведения об авторах

1. Куницын Вячеслав Евгеньевич — доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой; тел.: (495) 939-38-06, e-mail: [kunitsyn77@mail.ru](mailto:kunitsyn77@mail.ru).
2. Назаренко Марина Олеговна — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-20-89, e-mail: [m.o.nazarenko@mail.ru](mailto:m.o.nazarenko@mail.ru).
3. Нестеров Иван Анатольевич — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (495) 939-15-41, e-mail: [nia2002@yandex.ru](mailto:nia2002@yandex.ru).
4. Падохин Артем Михайлович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-28-77, e-mail: [padokhin@physics.msu.ru](mailto:padokhin@physics.msu.ru).