

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКЛИКА ИОНОСФЕРЫ НА СОЛНЕЧНЫЕ ВСПЫШКИ

О.Ю. Портнягина, Л.А. Леонович

### MODELING OF THE IONOSPHERIC RESPONSE TO THE SOLAR FLARES

O.Yu. Portnyagina, L.A. Leonovich

В работе представлены результаты сравнительного анализа отклика ионосферы на солнечные вспышки, полученного на основе данных GPS и теоретического моделирования. Для экспериментального исследования использовался метод, основанный на эффекте частичного «затенения» атмосферы земным шаром. Прямые лучи солнечного ионизирующего излучения от вспышки не попадают в область полной тени Земли. Для анализа использовались станции GPS, расположенные вблизи терминатора в ночной полусфере Земли. Траектории сигналов между передатчиком на спутнике и приемником на Земле для этих станций проходят частично через затененную часть атмосферы и частично через освещенную. Анализ степени затенения этих лучей и отклика полного электронного содержания (ПЭС), измеренного на их освещенной части, позволяет оценить вклад различных областей ионосферы в амплитуду отклика ПЭС. Результаты анализа показали, что в одних случаях до 35 % приращения ПЭС приходится на области ионосферы, лежащие выше 300 км, а в других увеличения ПЭС наблюдались только до высоты 300 км. Для изучения полученных эффектов использовалась теоретическая модель ионосферы и плазмосферы. Были исследованы высотно-временные вариации распределений концентраций заряженных частиц в области ионосферы от 100 до 1000 км во время солнечной вспышки. Анализ результатов показал, что увеличение электронной концентрации в верхней ионосфере может вызываться увеличением интенсивности ультрафиолетового излучения вспышек в некоторых участках спектра.

This paper proposes the results of the analysis of the ionospheric response to the solar flares. The method uses the effect of partial “shadowing” of the atmosphere by the terrestrial globe. The direct beams of the solar radiation from flare do not get in the Earth umbra field. The study of the solar flare influence on the atmosphere uses GPS stations located near the boundary of the shadow on the ground in the nightside hemisphere. The beams between the satellite-borne transmitter and the receiver on the ground for these stations pass partially through the atmosphere lying in the region of total shadow and partially through the illuminated atmosphere. By analyzing the degree of shadowing (illumination) of the beams between the transmitter and the receiver, it is possible to estimate the contribution from different regions of the ionosphere to the increase in TEC during the flare. The analysis results have shown, that in some cases about 30 % of the TEC increase correspond to ionospheric region, lying above 300 km and in others – an increase in TEC associated with solar flare was observable to 300 km only. The numerical model for ionosphere-plasmasphere coupling, developed at the ISTP SB RAS, was used to interpret the observational effects. The altitude-time variations of the electron density were explored in the height range from 100 km up to 1000 km during solar flare. The analysis results have shown, that the electron density enhancement in the upper ionosphere can be caused by intensity increasing of flare ultra-violet radiation in some intervals of the spectrum.

#### Введение

Солнечная активность определяет состояние околоземного космического пространства (ОКП), включая верхнюю атмосферу и ионосферу Земли. Наиболее резкие вариации ионизирующей радиации в ОКП возникают во время солнечных вспышек. Вспышка на Солнце представляет собой внезапное быстрое выделение энергии в верхней хромосфере или нижней короне, обычно над активными областями с развитыми группами солнечных пятен. Солнечная вспышка генерирует кратковременное электромагнитное излучение в широком диапазоне длин волн: от жесткого рентгеновского излучения с длиной волны  $\lambda \sim 10\text{--}9$  см, а в некоторых случаях от гамма-излучения ( $\lambda \sim 10\text{--}11$  см), до километровых радиоволн ( $\lambda \sim 106$  см) [1]. Все это приводит к сильным возмущениям основных параметров верхней атмосферы и ионосферы Земли.

Ионосферные возмущения, сопровождающие такие явления, обычно называют внезапными ионосферными возмущениями (ВИВ).

Основные особенности вариаций ионосферных параметров во время ВИВ заключаются в том, что максимальное относительное увеличение электронной концентрации (на порядок и более) имеет место в D-области ионосферы (на высотах  $\sim 60\text{--}85$  км), в E-области это увеличение составляет величину 50–200 %, а в F-области – от 10 % до 30 % [5].

В настоящее время нет достоверной и однозначной картины реакции ионосферы выше 100 км на солнечную вспышку. В ряде теоретических и экспериментальных исследований [2, 4, 14] получено, что эффекты солнечных вспышек проявляются главным образом на высотах, расположенных ниже максимума слоя F2.

С другой стороны, имеются наблюдения [5, 10, 11, 12], согласно которым ионосфера подвергается существенным изменениям на высотах, значительно превышающих максимум F2-слоя. Таким образом, процессы перестройки высотной структуры даже хорошо изученной среднеширотной ионосферы во время солнечных вспышек до конца не ясны.

В данной работе представлены результаты теоретического моделирования реакции среднеширотной ионосферы на высотах от 100 до 1000 км во время солнечной вспышки 23 сентября 1998 г. Результаты моделирования сопоставляются с данными измерений полного электронного содержания и электронной концентрации, полученными по данным некогерентного рассеяния и сети GPS во время солнечных вспышек.

#### Метод и результаты оценки вклада разных областей ионосферы в отклик ПЭС на солнечные вспышки по данным GPS

Метод, предложенный для изучения влияния солнечных вспышек на ионосферу Земли, основан

на эффекте частичного «затенения» атмосферы земным шаром [10].

Прямые лучи солнечного ионизирующего излучения от вспышки не попадают в область полной тени Земли. Для исследования влияния солнечной вспышки на ионосферу используются станции GPS, расположенные вблизи границы тени на Земле в ночной полусфере. Лучи между передатчиком на спутнике и приемником на Земле для этих станций проходят частично через атмосферу, лежащую в области полной тени, и частично через освещенную атмосферу. Можно считать, что амплитуда отклика, измеренная на луче, соответствует освещенной его части. Анализ степени затемнения (освещенности) лучей между передатчиком и приемником и амплитуды отклика ПЭС, измеренного на этих лучах, позволяет оценить вклад различных областей ионосферы в отклик ПЭС во время солнечной вспышки. На рис. 1 приведена схема образования конуса полной тени Земли (без учета масштаба) в геоцентрической солнечно-эклиптической системе координат.

Первичными данными при обработке являются географические координаты станций GPS на Земле (рис. 1, точка Р), угол места, отсчитываемый от земной поверхности, и азимут луча на ИСЗ GPS, отсчитываемый от направления на север по часовой стрелке, для момента времени (UT), соответствующего фазе максимума солнечной вспышки в рентгеновском диапазоне. Для нахождения координат точки С пересечения луча и границы тени решается система уравнений: уравнение конуса (полной тени)

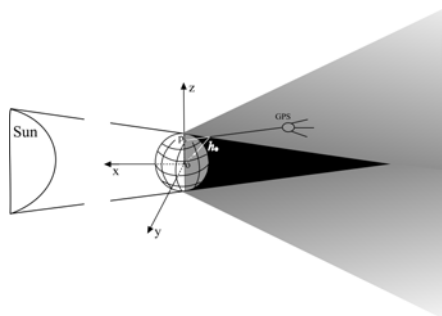


Рис. 1. Схема образования конуса полной тени Земли (без учета масштаба) в геоцентрической солнечно-эклиптической системе координат: ось Z направлена к северу перпендикулярно плоскости эклиптики; ось X – на Солнце; ось Y направлена перпендикулярно этим осям; точка P отмечает положение станции GPS на поверхности Земли; С – точка, в которой луч между спутником GPS и станцией пересекает границу конуса полной тени Земли;  $h_0$  – высота этой точки над поверхностью Земли.

и уравнение прямой линии (луч между передатчиком и приемником), заданной параметрически. Затем определяется высота полученной точки С над поверхностью Земли (рис. 1, линия  $h_0$ ). Полученная величина  $h_0$  и является высотой тени.

Описанный метод был применен для исследования отклика ионосферы на ряд солнечных вспышек класса X, наблюдавшихся в различные сезоны года в спокойный геомагнитный период. Параметры вспышек и результаты оценки вклада верхней (> 300 км) и нижней областей ионосферы в отклик ПЭС представлены в табл. 1: день года (День), дата (Дата), время вспышки в рентгеновском диапазоне (время начала–время максимума–время окончания), класс вспышки в рентгеновском диапазоне (Класс), геомагнитная обстановка в этот день ( $K_p$  и  $D_{st}$ ), количество станций-приемников сигналов GPS, используемых для анализа, вклад верхней ионосферы (> 300 км) в процентах в отклик ПЭС.

Результаты анализа данных GPS показали, что в некоторых вспышках верхняя ионосфера дает вклад в ПЭС до 30 % и более (табл. 1, последний столбец), в то время как в других (13.12.01 г. и 28.11.98 г.) отклик наблюдается только до высоты 300 км.

Полученные оценки согласуются с экспериментальными результатами, представленными как в работе [12], где авторы, исследуя профиль электронной концентрации в диапазоне высот от 125 км до 1200 км при помощи метода НР, пришли к выводу, что около 40 % приращения ПЭС во время вспышки приходится на области ионосферы, лежащие выше 300 км, так и в работе [14], где авторы, также используя метод НР для исследования ионосферных эффектов двух других мощных солнечных вспышек, отметили, что увеличение электронной концентрации, ассоциированное с солнечной вспышкой, было заметно только до высоты 300 км. Полученные результаты можно объяснить тем, что каждая вспышка на Солнце является уникальным событием, которое характеризуется собственным спектром и его динамикой в процессе вспышки.

### Результаты моделирование отклика ионосферы на солнечную вспышку

Для изучения полученных эффектов использовалась теоретическая модель ионосферно-плазмозферного взаимодействия [3], которая позволяет рассчитывать такие характеристики тепловой ионосферной плазмы, как ее состав, температуры электронов и ионов, потоки частиц и тепла. Модель основана

Таблица 1

Параметры вспышек и результаты анализа

| День | Дата       | Время             | Класс | $K_p$ | $D_{st}$ | Кол-во станций | $\Delta$ ПЭС, %<br>$h_0 > 300$ км |
|------|------------|-------------------|-------|-------|----------|----------------|-----------------------------------|
| 196  | 14.07.2000 | 10:03–10:24–10:43 | X57   | 4     | –10      | 45             | 30                                |
| 332  | 28.11.1998 | 04:54–05:52–06:13 | X33   | 2     | –11      | 21             | 0                                 |
| 347  | 13.12.2001 | 14:20–14:30–14:35 | X62   | 1     | 1        | 28             | 0                                 |
| 328  | 24.11.1998 | 02:07–02:20–02:37 | X10   | 4     | 0        | 27             | 20                                |
| 204  | 23.07.2002 | 00:18–01:30–00:35 | X48   | 3     | –7       | 35             | 35                                |
| 267  | 24.09.2001 | 09:32–10:38–11:09 | X26   | 3     | –13      | 20             | 30                                |

на численном решении нестационарных уравнений баланса частиц и энергии тепловой плазмы в замкнутых геомагнитных силовых трубках, основания которых лежат на высоте  $h = 100$  км. Полагается, что ионосферная плазма состоит из электронов, атомарных ионов  $H^+$ ,  $O^+$ , а также молекулярных ионов  $NO^+$ ,  $N_2^+$ ,  $O_2^+$ . Для расчета скоростей фотоионизации термосферных составляющих  $O$ ,  $O_2$ ,  $N_2$  и энергетических спектров первичных фотоэлектронов при невозмущенных условиях (без вспышки) в модели использовался спектр ультрафиолетового излучения Солнца, представленный в [15] и спектр рентгеновского излучения из работы [13]. Для описания пространственно-временных вариаций температуры атмосферы, концентраций нейтральных компонентов  $O$ ,  $O_2$ ,  $N_2$  и  $H$  использовалась глобальная эмпирическая модель термосферы MSIS-6 [8].

Для исследования эффектов солнечной вспышки, которая произошла в 6.7 UT 23 сентября 1998 г., была построена модель возмущенного спектра солнечного излучения в рентгеновском и ультрафиолетовом диапазонах. В соответствии с наличием импульсной и медленной фаз вспышки предполагалось, что в интервале длин волн 0.1–10 нм спектр остается возмущенным в течение 40 мин, а в интервале 10–105 нм – в течение 15 мин. Для того чтобы задать величину возмущения потока солнечной энергии, весь интервал длин волн был разбит на 6 частей и для каждой было выбрано наиболее типичное значение фактора интенсивности [1, 2, 5, 7, 9], который определялся как отношение потока энергии во время вспышки к потоку излучения спокойного Солнца. В табл. 2 приведены значения факторов интенсивности вспышки для каждого спектрального интервала. Чтобы ясно увидеть, как увеличение интенсивности разных участков ультрафиолетового спектра может влиять на структуру высотного профиля интегрального содержания, весь ультрафиолетовый спектр 10–105 нм был разбит на 18 равных интервалов и поочередно для каждого интервала фактор интенсивности вспышечного излучения увеличивался до 30.

Реакция среднеширотной ионосферы на рассматриваемую солнечную вспышку моделировалась путем расчета вариаций плазменных параметров для силовой трубки, основание которой расположено в точке с координатами  $\varphi = 520$  с.ш.,  $\lambda = 104$  в.д. Расчет был выполнен для периода с 14 по 24 сентября 1998 г. с использованием произвольных начальных условий, соответствующих низкому содержанию тепловой плазмы в трубке. Рассмотренный интервал

Таблица 2

Увеличение интенсивности солнечного излучения для отдельных участков спектра во время вспышки

| Интервалы, нм        | 0.1–0.8 | 0.8–2 | 2–4 | 4–6 | 6–10 | 10–105 |
|----------------------|---------|-------|-----|-----|------|--------|
| Фактор интенсивности | 1000    | 100   | 50  | 20  | 4    | 1.3    |

характеризовался умеренным уровнем солнечной и геомагнитной активностей ( $F10.7 = 125$ ,  $A_p = 7$ ).

С целью изучения вкладов нижней и верхней областей ионосферы в высотный профиль ПЭС были выполнены расчеты интегрального электронного содержания как функции высоты:

$$ИЭС(h) = \int_{h_0}^h N_e(h') dh',$$

а также приращения электронного содержания в максимальную фазу вспышки:

$$dИЭС(h) = \frac{ИЭС(h)}{ИЭС(1000 \text{ км})} \cdot 100 \%$$

Примеры полученных высотных профилей интегрального содержания до вспышки и во время вспышки, когда фактор интенсивности для отдельных интервалов ультрафиолетового спектра (10–15, 15–20, 55–60, 85–90 нм) был увеличен до 30 (а), а также приращений электронного содержания в процентах для этих же случаев (б) приведены на рис. 2. Полученные результаты позволяют оценивать вклад различных областей ионосферы в высотный профиль ПЭС. Из рис. 2, б следует, что для случая, когда фактор интенсивности для интервала 85–90 нм (сплошная жирная линия) был увеличен до 30, вклад верхней ионосферы ( $h > 300$  км) в приращение ПЭС составил 35 %, а для случая, когда фактор интенсивности был увеличен для интервала 15–20 нм, вклад верхней ионосферы составил только 15 %.

График, показывающий вклад верхней ионосферы ( $h > 300$  км) в процентах в приращение ПЭС для каждого интервала, фактор интенсивности которого во время вспышки был увеличен до 30, приведен на рис. 3.

Результаты моделирования показывают, что увеличение электронной концентрации в верхней ионосфере может вызываться увеличением интенсивности

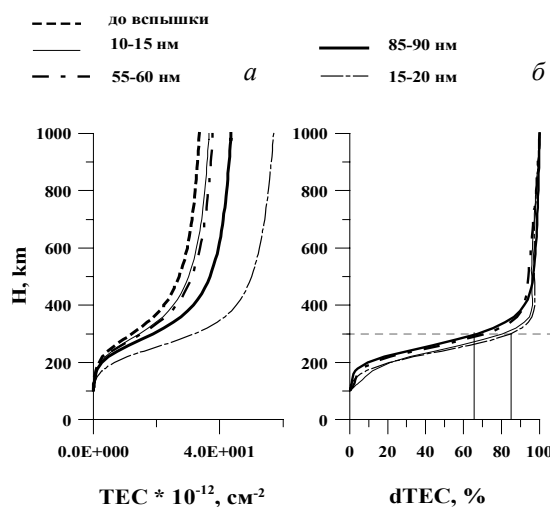


Рис. 2. Примеры полученных высотных профилей интегрального содержания до вспышки и во время вспышки, когда фактор интенсивности для каждого из интервалов ультрафиолетового спектра (10–15, 15–20, 55–60, 85–90 нм) был увеличен до 30 (а), а также приращений электронного содержания в процентах для этих же случаев (б).



Рис. 3. График, показывающий вклад верхней ионосферы ( $h > 300$  км) в процентах в приращение интегрального электронного содержания для каждого интервала ультрафиолетового спектра, фактор интенсивности которого во время вспышки был увеличен до 30.

излучения во время вспышек в некоторых участках ультрафиолетового спектра.

Настоящая работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 05-05-64634) и гранта ведущих научных школ Российской Федерации N НШ-272.2003.5.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авакян С.В., Вдовин А.И., Пустарнаков В.Ф. Ионизирующие и проникающие излучения в околоземном космическом пространстве. СПб.: Гидрометеоздат, 1994.
2. Кореньков Ю.Н., Намгаладзе А.А. Моделирование ионосферных эффектов солнечной вспышки // Ионосферные возмущения и методы их прогноза. М.: Наука, 1977. С. 85–91.
3. Кринберг И.А., Тащилин А.В. Ионосфера и плазмосфера. М.: Наука, 1984.
4. Лукичева Т.Н. Мингалев В.С. Моделирование поведения высокоширотных E- и F-областей ионосферы во

время солнечных вспышек // Исследование ионосферы высоких широт. Апатиты, 1990. С. 4–10.

5. Митра А. Воздействие солнечных вспышек на ионосферу Земли. М.: Мир.

6. Donnelly R.F. Contribution of X-ray and EUV bursts of solar flares to Sudden frequency deviations // J. Geophys. Res. 1969. V. 74. P. 1873–1877.

7. Garriott O.K., Da Rosa A.V., Davis M.J. et al. Enhancement of ionizing radiation during a solar flare // Solar Phys. 1969. V. 8. P. 226.

8. Hedin A.E., Biondi M.A., Burnside R.G. et al. Revised global model of thermosphere winds using satellite and ground-based observation // J. Geophys. Res. 1991. V. 96, N 5. P. 7657–7688.

9. Horan D.M., Kreplin R.W. Simultaneous measurements of EUV and soft X-ray solar flare emission // Solar Phys. 1981. V. 74, N 1. P. 265–272.

10. Leonovich L.A., Afraimovich E.L., Romanova E.B., Taschilin A.V. Estimating the contribution from different ionospheric regions to the TEC response to the solar flares using data from the international GPS network // Ann. Geophys. 2002. V. 20. P. 1935–1941.

11. Mendillo M., Klobuchar J.A., Fritz R.B. et al. Behavior of the Ionospheric F Region During the Great Solar Flare of August 7, 1972 // J. Geophys. Res. 1974. 79. P. 665–672.

12. Mendillo M., Evans J.V. Incoherent scatter observations of the ionospheric response to a large solar flare // Radio Sci. 1974. V. 9. P. 197–203.

13. Nusinov A.A. // Proceeding of the Workshop on the Solar Electromagnetic Radiation Study for Solar Cycle 22 Space Environment Laboratory. NOAA ERL. July 1992. P. 354–359.

14. Thome G.D., Wagner L.S. Elektron density enhancements in the E and F regions of the ionosphere during solar flares // J. Geophys. Res. 1981. V. 76. P. 6883–6895.

15. Richards P.G., Fennelly J.A., Tor D.G. EUVAC: A solar EUV flux model for aeronomic calculations // Ibid. 1994. V. 99. P. 8981–8992.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск