

## ОТНОСИТЕЛЬНАЯ АМПЛИТУДА ВАРИАЦИЙ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ПО ДАННЫМ ГЛОБАЛЬНОЙ СЕТИ GPS

<sup>1</sup>Э.Л. Афраимович, <sup>2</sup>И.В. Живетьев, <sup>1</sup>Е.А. Косогоров

### RELATIVE AMPLITUDE OF TOTAL ELECTRON CONTENT VARIATIONS AS DEDUCED FROM GLOBAL GPS NETWORK

<sup>1</sup>E.L. Afraimovich, <sup>2</sup>I.V. Zhivetiev, <sup>1</sup>E.A. Kosogorov

В статье описывается разработанный авторами метод оценки относительной амплитуды  $dI/I$  вариаций полного электронного содержания (ПЭС) по данным глобальной сети GPS. Приводятся результаты анализа среднеширотной суточной зависимости  $dI/I$  для 51 сут с различным уровнем геомагнитной активности.

In the present paper the authors describe the developed method of estimation of  $dI/I$  variation relative amplitude of total electron content (TEC) according to the data of GPS global network. The results of the analysis of  $dI/I$  daily dependence for mid-latitudes are given for 51 days with different level of geomagnetic activity.

#### Введение

Перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ) возникают при распространении в ионосфере атмосферных акустико-гравитационных волн (АГВ), которые играют важную роль в энергетике и динамике атмосферы Земли [1, 2]. ПИВ влияют на характеристики радиоканалов, используемых в радиосвязи, пеленгации, радиолокации и радиоастрономии [1, 3]. В эксперименте изучение ПИВ основано на использовании радиофизических методов радиозондирования ионосферы при вертикальном, наклонном зондировании в КВ-диапазоне, при трансионосферном зондировании сигналами низкоорбитальных и геостационарных ИСЗ [1–3]. В последнее время значительный прогресс в исследованиях ПИВ связан с использованием новой технологии радиозондирования сигналами спутниковой навигационной системы GPS [4], позволяющей получить данные о вариациях полного электронного содержания (ПЭС) в ионосфере с высоким пространственно-временным разрешением в различных регионах земного шара. Знание пространственно-временных характеристик относительной амплитуды вариаций ПЭС в диапазоне периодов АГВ необходимо не только для изучения механизмов генерации и распространения АГВ, но и для оценки их влияния на параметры сигналов спутниковых радиотехнических систем различного назначения [3].

Задачей настоящей работы является комплексное исследование пространственно-временных характеристик абсолютной ( $dI$ ) и относительной ( $dI/I$ ) амплитуды вариаций ПЭС в спокойных и возмущенных геомагнитных условиях. С этой целью было выбрано 12 спокойных суток (индекс  $K_p < 3$ ) и 40 возмущенных в период с 1999 по 2005 г. Для получения наиболее достоверных данных была выбрана территория Северной Америки (30–60 N; 200–300 E), где размещено не менее 800 станций GPS.

#### Метод обработки данных

Абсолютное значение  $dI$  амплитуды вариаций ПЭС определяется по вариациям рядов ПЭС, полученных из представленных в сети Интернет RINEX-файлов [5]. Ряды ПЭС  $I(t)$  длительностью 2.3 ч фильтруются в диапазоне периодов 2–10 мин и

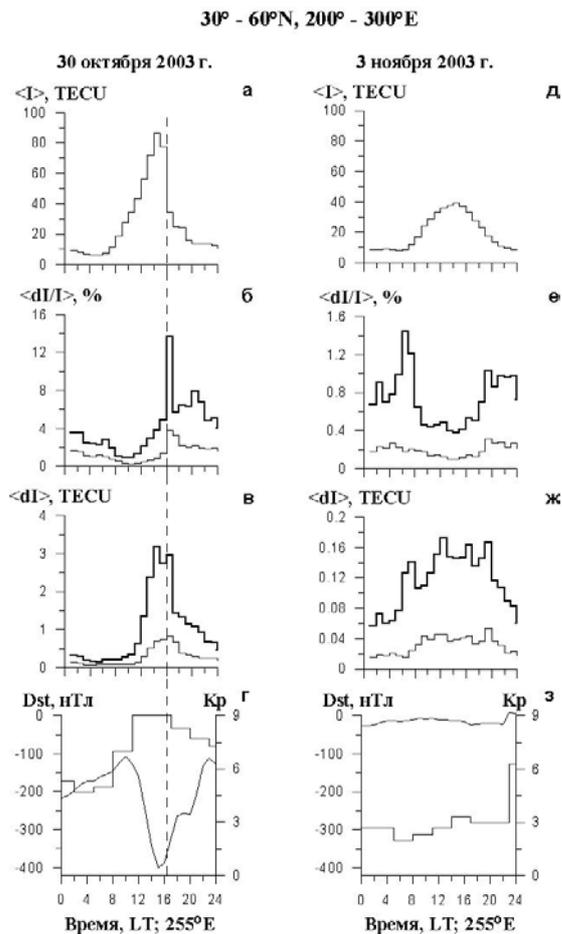
20–60 мин. Эти диапазоны условно соответствуют среднemasштабным (СМ) и крупномасштабным (КМ) ПИВ. Затем вычисляются значения среднеквадратичного отклонения (СКО) для всех рядов (лучей «приемник–ИСЗ GPS»), полученных для всех станций GPS и для всех ИСЗ, «видимых» с данной станции в течение выбранного интервала времени.

Относительная амплитуда  $dI/I$  определяется путем нормировки величины  $dI$  на фоновое значение  $I$ , в качестве которого используются значения абсолютного «вертикального» ПЭС, полученные с двухчасовым временным разрешением по глобальным картам ПЭС в формате IONEX, так называемым GIM-картам [6, 7]. Пространственный диапазон карт – от 0° до 360° по долготе и от –90° до 90° по широте; пространственное разрешение задается размерами элементарной GIM-ячейки (5° по долготе и 2.5° по широте). Для нормировки используются значения  $I$  для ячейки GIM, расположенной ближе всего к станции GPS, по данным которой определялась величина  $dI$ .

Для выбранной территории значения  $I$  и  $dI/I$  усреднялись с целью получения среднестатистической оценки ПЭС  $\langle I \rangle$ , абсолютной  $\langle dI \rangle$  и относительной амплитуды  $\langle dI/I \rangle$  вариаций ПЭС в диапазоне периодов КМ и СМ ПИВ. Всего за сутки усреднение проводилось для 22 интервалов времени длительностью 2.3 ч, сдвинутых на 1 ч. При среднем числе станций GPS около 500 и не менее 5 одновременно «видимых» ИСЗ среднее число рядов ПЭС с хорошим качеством данных за сутки составляло не менее 18000.

#### Суточная зависимость амплитуды вариаций ПЭС

Для иллюстрации типичной суточной зависимости были выбраны два дня: умеренно возмущенный (спокойный) день 03.11.2003 г. и мощная магнитная буря 30.10.2003 г. (рисунок справа и слева соответственно). На рисунке видно плавное изменение  $\langle I \rangle$  в спокойный период, максимум ПЭС достигается к полудню; абсолютная амплитуда  $\langle dI \rangle$  меняется в пределах до 0.1 TECU ( $10^{16} \text{ м}^{-2}$ ), достигая максимальной величины также в полдень. Однако в возмущенных условиях характер зависимости  $\langle I \rangle$  меняется, значение абсолютной амплитуды  $\langle dI \rangle$  возрастает на порядок и



Индексы геомагнитной активности  $D_{st}$  и  $K_p$  (г, з); суточные зависимости  $\langle I \rangle$  усредненных значений ПЭС (а, д), относительной  $\langle dI/I \rangle$  (б, е) и абсолютной  $\langle dI \rangle$  (в, ж) амплитуды СМ ПИВ (тонкие линии) и КМ ПИВ (жирные линии) вариаций ПЭС для магнитной бури 30.10.2003 г. и умеренно возмущенного дня 03.11.2003 г. Вертикальной чертой отмечен момент резкого всплеска относительной амплитуды вариаций ПЭС.

достигает 3 TECU, а максимум смещается с полудня на момент времени, соответствующий максимальному отклонению индекса  $D_{st}$  при очень высоком уровне  $K_p = 9$ .

Суточная зависимость относительной амплитуды  $\langle dI/I \rangle$  кардинально отличается от абсолютной  $\langle dI \rangle$ ; особенно это выражено в спокойных условиях: максимальные значения  $\langle dI/I \rangle$  для СМ и КМ ПИВ наблюдаются ночью, а не днем.

В возмущенных условиях изменения  $\langle dI/I \rangle$  определяются не только суточной зависимостью, но и состоянием магнитного поля. Вертикальной чертой на рисунке отмечен момент резкого всплеска относительной амплитуды  $\langle dI/I \rangle$  вариаций ПЭС 30 октября 2003 г., когда величина  $\langle dI/I \rangle$  достигает 14 %. Этот пример показывает, что геомагнитный контроль амплитуды вариаций ПЭС при высоких уровнях возмущения магнитного поля оказывается более существенным, чем нормальные суточные изменения.

### Обсуждение

Наши данные согласуются с результатами измерений абсолютной амплитуды  $\langle dI \rangle$  вариаций ПЭС, полученных при трансionoсферном УКВ-зондировании

сигналом геостационарного ИСЗ ETS-2 [2], а также с данными анализа спектра вариаций ПЭС по данным GPS [8]. Неожиданной оказалась обратная зависимость относительной амплитуды вариаций ПЭС в спокойный период: максимальные значения  $\langle dI/I \rangle$  наблюдаются ночью, а не днем. Это означает, что механизмы генерации и распространения АГВ в ночное и дневное время отличаются существенно.

Запаздывание на 2 ч резкого всплеска относительной амплитуды  $\langle dI/I \rangle$  относительно быстрых изменений напряженности магнитного поля во время магнитной бури 30 октября 2003 г. можно объяснить следующим. Основной вес при усреднении имеет среднелатитудный пояс станций GPS. Этот пояс отстоит от южной границы аврорального источника ПИВ, возникающего при геомагнитных возмущениях, на расстояние порядка 2000 км. Генерируемые при возникновении этого источника ПИВ перемещаются в сторону экватора со скоростью 300–400 м/с [8].

Авторы благодарны В.А. Медведеву за интерес к работе и полезную дискуссию и С.В. Воейкову за помощь при первичной обработке данных. Эта работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 03-05-64100 и 05-05-64634), интеграционного гранта СО РАН – ДВО РАН № 181, а также гранта N НШ-272.2003.5 государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации. Мы благодарим сотрудников Scripps Orbit and Permanent Array Center (SOPAC) за предоставление используемых в настоящей статье первичных данных глобальной сети наземных двухчастотных приемников GPS.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афраймович Э.Л. Интерференционные методы радиозондирования ионосферы. М.: Наука, 1982. 198 с.
2. Afraimovich E.L., Boitman O.N., Zhovty E.I. et al. Dynamics and anisotropy of traveling ionospheric disturbances as deduced from transionospheric sounding data // Radio Sci. 1999. V. 34, N 2. P. 477–487.
3. Афраймович Э.Л., Караченцев В.А., Неудакин А.А. Тестирование трансionoсферного канала распространения радиоволн по данным глобальной сети многоканальных двухчастотных приемников GPS // Радиотехника и электроника. 2004. Т. 49, № 5. С. 532–541.
4. Davies K., Hartmann G. K. Studying the ionosphere with the Global Positioning System // Radio Science. 1997. V. 32, N. 4. P. 1695–1703.
5. <ftp://sopac.ucsd.edu/pub/>
6. Mannucci A.J., Wilson B.D., Yuan D.N. et al. A global mapping technique for GPS-derived ionospheric total electron content measurements // Radio Science. 1998. V. 33. P. 565–582.
7. <ftp://cddisa.gsfc.nasa.gov/>
8. Afraimovich E.L., Kosogorov E.A., Lesyuta O.S. et al. Geomagnetic control of the spectrum of traveling ionospheric disturbances based on data from a global GPS network // Annals of Geophys. 2001. V. 19, N 7. P. 723–731.

<sup>1</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск

<sup>2</sup>Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Паратунка