

В работе [8] впервые был обнаружен квазистационарный эффект магнитного зенита, который приводит к уменьшению электронной концентрации и формированию неоднородностей, простирающихся вдоль линии магнитного поля, вследствие влияния мощного высокочастотного излучения. Однако крайне важно сравнить эти результаты со статистикой естественных МОН.

#### **Благодарности**

Авторы благодарят Потехина А.П. и Медведева А.В. за интерес к работе. Мы выражаем благодарность научным группам SOPAC и CORS за данные GPS. Работа поддержана Фундаментальной исследовательской программой физического отделения РАН (Проект IV.12 “Современные проблемы радиофизики”), грантом РФФИ 10-05-00113-а.

#### **Литература**

1. Ma G., Maruyama T. A super bubble detected by dense GPS network at east Asian longitudes // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33. L21103.
2. Huang C.-S., Foster J.C., Sahai Y. Significant depletions of the ionospheric plasma density at middle latitudes: A possible signature of equatorial spread F bubbles near the plasmapause // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. A05315.
3. Hysell D.L. An overview and synthesis of plasma irregularities in equatorial spread F // J. Atmos. Solar Terr. Phys. 2000. V. 62. P. 1037–1056.
4. Yokoyama T. Su S.-Yi, Fukao S. Plasma blobs and irregularities concurrently observed by ROCSAT-1 and Equatorial Atmosphere Radar // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. A05311.
5. Kintner P. M., Ledvina B. M., de Paula E. R., Kantor I. J. Size, shape, orientation, speed, and duration of GPS equatorial anomaly scintillations // Radio Sci. 2004. V. 39. RS2012.
6. Afraimovich E.L., Astafieva E.I., Voyeikov S.V. Isolated ionospheric disturbances as deduced from global GPS network // Ann. Geophys. 2004. V. 22, N 1. P. 47-62.
7. Афраимович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли // Иркутск: Изд-во ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАН, 2006. 480 с.
8. Терещенко Е.Д., Милченко А.Н., Фролов В.Л., Юрик Р.Ю. Наблюдение эффекта магнитного зенита с использованием сигналов спутников GPS/ГЛОНАСС // Известия ВУЗов. Радиофизика. 2008. Т. 51, № 11. С. 934-938.

### **ОТЛИЧИЕ СУТОЧНЫХ ВАРИАЦИЙ ПЭС ПО ДАННЫМ ГЛОБАЛЬНЫХ КАРТ GIM РАЗЛИЧНЫХ ЛАБОРАТОРИЙ, РЕГИОНАЛЬНЫХ СЕВЕРОАМЕРИКАНСКИХ КАРТ US- TEC И МОДЕЛИ IRI**

### **DIFFERENCE OF TEC DAILY VARIATIONS DEDUCED FROM GLOBAL IONOSPHERE MAPS OF DIFFERENT LABORATORIES, REGIONAL NORTH-AMERICAN TEC MAPS US-TEC AND IRI MODEL**

Ю.В. Ясюкевич, К.Г. Ратовский, А.С. Полякова, А.А. Шейфлер  
Институт Солнечно-Земной Физики СО РАН, yasukevich@iszf.irk.ru

*Nowadays ionosphere total electron content (TEC) mapping technique is widely adopted. On the basis of this data it is possible to study daily variations for ionosphere physics purposes. Global ionosphere maps (GIM) allow us to evaluate the amplitude of daily variations, maximal and minimal TEC value, rate of ionization increasing near the solar terminator in different regions of the Earth. Moreover there is regional North-American ionosphere maps. However, GIM and US-TEC are calculated by different laboratories on the basis of different assumptions. Any assumption results in some errors and so it is interesting to compare TEC daily variations from GIM and US-TEC. In the report we compare amplitude and half-width of daily variations, rate of ionization increasing for different level of solar and geomagnetic activity. Results are compared with IRI-2007 model data.*

#### **1. Введение**

В настоящее время развитие средств радиозондирования ионосферы и моделирования предоставляет возможность непрерывного и глобального мониторинга полного электронного содержания (ПЭС) в ионосфере Земли. В качестве экспериментальных измерений над территорией земной поверхности могут использоваться данные глобальных и региональных наземных сетей приемников навигационных систем (GPS, GLONASS, в ближайшие годы войдет в строй европейская система GALLILEO), а также вычисленные по этим данным глобальные (Global Ionosphere Maps - GIM) [1, 2] и региональные карты ПЭС [3]. Общепринятой единицей измерения полного электронного содержания является TECU (total electron content unit; 1 TECU=10<sup>16</sup> эл/м<sup>2</sup>). Начиная с 1991 г. над территорией океана появилась возможность исследовать ионосферу на основе данных спутниковых высотометров (Torax/Poseidon, Jason-1, Jason-2, <http://www.avisio.oceanobs.com/>). Кроме того, существует ряд ионосферных моделей, которые позволяют рассчитать профиль электронной концентрации и ПЭС

вдоль направления распространения сигнала. Международная справочная модель ионосферы (International Reference Ionosphere; IRI) фактически является стандартом при расчете ионосферных параметров для различных исследовательских и прикладных задач [4].

Данные средства позволяют исследовать как пространственное распределение ионизации, так и вариации различных периодов. При использовании глобальных (региональных) карт (моделей) для прикладных задач необходимо в первую очередь иметь представление о точности воспроизведения суточных вариаций. Глобальные карты GIM и региональные карты US-TEC рассчитываются различными лабораториями с привлечением некоторых моделей. Любое использование моделей приводит к тем или иным ошибкам, поэтому при использовании подобных данных необходимо сравнить параметры суточных вариации ПЭС по данным карт GIM различных лабораторий и региональных североамериканских карт. В работе делается сравнение амплитуды, полуширины вариаций, скорости нарастания ионизации для различного уровня солнечной и геомагнитной активности. Анализ проводится для региона северной Америки ( $50 - 60^\circ$  с.ш.,  $-120^\circ - -105^\circ$  в.д.) за период времени 15 октября 2004 г. – 1 января 2009 г.

## 2. Анализируемые данные

Технология построения глобальных карт абсолютного вертикального ПЭС GIM (Global Ionosphere Maps) по данным международной сети IGS-GPS была создана рядом авторов [1, 2, 5]. Карты GIM с двухчасовым временным разрешением в стандартном формате IONEX представлены на сайте Интернет (<ftp://cddisa.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/ionex>). Пространственный диапазон карт – от  $0^\circ$  до  $360^\circ$  по долготе и от  $-90^\circ$  до  $90^\circ$  по широте, а пространственное разрешение задается размерами элементарной GIM-ячейки -  $5^\circ$  по долготе и  $2.5^\circ$  по широте.

Каждый файл IONEX содержит мировые карты ПЭС за одни сутки по шкале мирового времени UT, а также данные о погрешности вычисления ПЭС, определяемые как среднеквадратичное отклонение результатов восстановления пространственно-временного распределения ПЭС по данным измерений группового и фазового запаздывания сигналов всего набора спутников GPS, наблюдаемого в данный временной интервал в пределах GIM-ячейки. Глобальные карты ПЭС в формате IONEX рассчитываются в различных научных центрах: Center for Orbit Determination in Europe, University of Berne, Switzerland (CODG, <http://www.cx.unibe.ch>); Jet Propulsion Laboratory of California Institute of Technology (JPLG, <http://www.jpl.nasa.gov>); Grup Universitat Politecnica de Catalunya (UPCG, <http://www.upc.es>); European Space Agency Group (ESAG, <http://www.esa.int>).

Алгоритмы восстановления пространственно-временного распределения ПЭС, разработанные в упомянутых научных центрах, описаны в ряде публикаций [1, 2]. Несмотря на различие этих алгоритмов, общая концепция восстановления абсолютного «вертикального» значения ПЭС основана на подборе оптимальных параметров выбранной модели вертикального распределения электронной концентрации с высотой (N(h)-профиля). В качестве такой модели как правило выбирается тонкий слой на некоторой высоте. Для такой модели рассчитываются значения ожидаемой ионосферной поправки к значению дальности до ИСЗ для реальных значений углов зрения на ИСЗ. Затем расчетные значения поправок сравниваются с измеренными, и этот процесс для различных параметров модели N(h)-профиля повторяется до тех пор, пока не будут получены минимальные значения невязок, соответствующие представленным в файле IONEX величинам СКО. Далее для «оптимального» по минимуму невязок N(h)-профиля рассчитывается «вертикальное» ПЭС, которое по существу равно среднему значению ПЭС для выбранной GIM-ячейки. В последнее время появились региональные карты ПЭС, обладающие более высоким пространственным разрешением: северо-американская карта US TEC, временное разрешение 15 мин, пространственное -  $1^\circ$  по широте и долготе; европейская карта, временное разрешение 10 мин, пространственное -  $1^\circ$ ; южно-американская карта LPIM, временное разрешение 1 час, пространственное -  $1^\circ$ ; японская карта, пространственное разрешение  $0.5^\circ$ , временное - 5 и 15 мин и т.д. Алгоритм расчета подобных карт подобен алгоритму расчета GIM, однако они используют различные исходные модели вертикального распределения электронной концентрации.

Международная справочная модель ионосферы (International Reference Ionosphere; IRI) фактически является стандартом при расчете ионосферных параметров для различных исследовательских и прикладных задач [4]. IRI описывает среднемесячные ионосферные параметры: ионный состав ( $O^+$ ,  $H^+$ ,  $N^+$ ,  $He^+$ ,  $O_2^+$ ,  $NO^+$ ), дрейф ионов, плотность и температуру электронов, ПЭС. В новейшей версии IRI-2007 значительно усовершенствована модель профиля электронной концентрации выше максимума F2 слоя. В настоящей работе мы использовали стандартный набор опций моделей IRI-2007, в частности набор коэффициентов URSI. Для моделирования состояния ионосферы во время геомагнитных возмущений использована «модель шторма».

На рис. 1 представлены типичные суточные вариации ПЭС 4 января 2006 г. На панели *a*

приведены вариации ПЭС полученные по картам GIM лабораторий CODG, JPLG, ESAG, UPCG. Как можно видеть, отличается как амплитуда вариаций  $A$ , так и максимальное значение ПЭС. Для различных лабораторий несколько отличается и полуширина максимума ПЭС  $\Delta T$ , которая определяется по уменьшению ПЭС от максимума до половины амплитуды. На панели **б** дано сравнение карт GIM CODG, региональных карт US-TEC и модели IRI. Можно видеть достаточно хорошее подобие амплитуды вариаций, максимального и минимального значения ПЭС. Однако карты US-TEC характеризуются небольшим предполуденным максимумом.

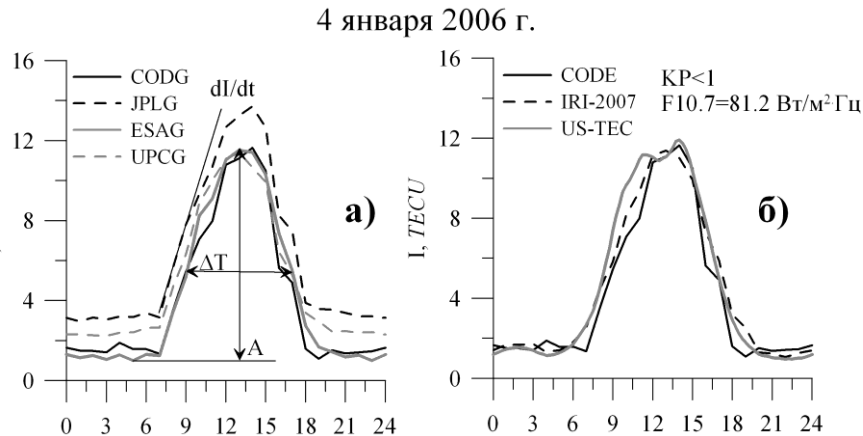


Рис. 1 – Суточные вариации ПЭС над территорией США в магнитоспокойный день 4 января 2006 г.

На рис. 2 представлено пространственное распределение амплитуды  $A$  суточных вариаций по данным карт GIM JPLG. Черной кривой нанесен геомагнитный экватор. Видно, что наибольшая амплитуда суточных вариаций характерна для области экваториальной аномалии.

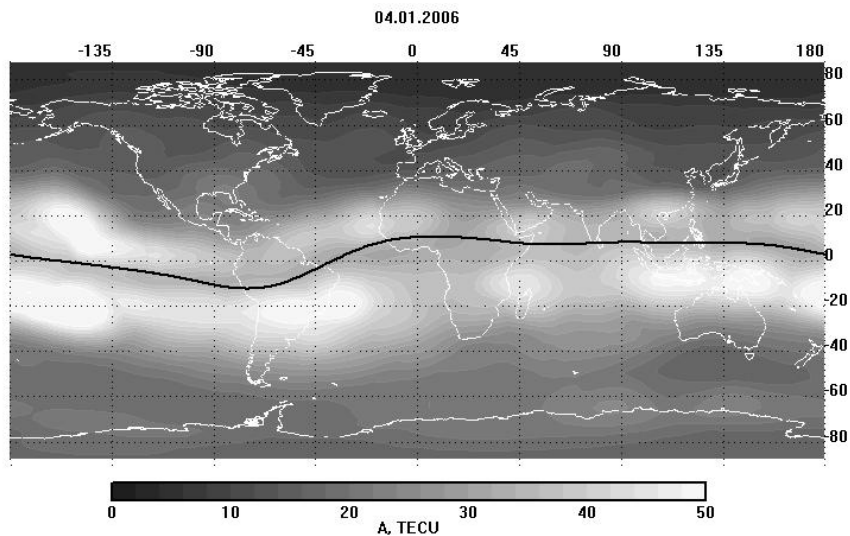


Рис. 2 – пространственное распределение амплитуды суточных вариаций ПЭС за 4 января 2006 г.

### 3. Статистика параметров суточных вариаций

На рис. 3 представлены нормированные распределения амплитуды  $A$ , полуширины  $\Delta T$  суточных вариаций, и максимальной скорости роста ионизации  $V$ . Панели **а-в** для карт GIM различных лабораторий, **г-е** – для карт GIM CODG, региональных карт US-TEC, и модели IRI-2007. Распределение амплитуды вариаций представлено на панелях **а, г**, скорости роста ионизации – **б, д**, полуширины вариаций **в, е**.

Даже для глобальных карт существует значительное отличие наиболее вероятного значения амплитуды суточных вариаций (рис. 3а). Для лаборатории UPCG эта величина минимальна и составляет 6 TECU, для лаборатории CODG – 6.5, ESAG – 7 TECU, JPLG – 7.5 TECU. Карты US-TEC показывают более существенную величину наиболее вероятной амплитуды вариаций – 8 TECU, а модель IRI-2007 – более низкое значение – 6 TECU.

Наибольшая скорость роста ионизации (рис. 3 **б, д**) лежит в диапазоне  $\sim 0.5$ -3 TECU/час. Все карты GIM показывают приблизительно одинаковую максимальную скорость роста ионизации, за

исключением карт UPCG, в которых скорость нарастания ионизации несколько ниже. Также она несколько ниже и в модели IRI-2007.

Полуширину вариаций (панели *в*, *е*), составляющую 5-18 часов в зависимости от времени года, карты GIM отражают примерно одинаково. В то же время по данным региональных карт US-TEC и модели IRI-2007 эта величина оказывается не менее 7 часов.

На рис. 4 представлена зависимость амплитуды суточных вариаций от уровня солнечной (*а-в*) и геомагнитной активности (*г-е*). Как можно видеть амплитуда вариаций по данным модели и эксперимента практически не зависит от уровня геомагнитной активности. Для экспериментальных данных характерно линейное увеличение амплитуды с ростом потока солнечного радиоизлучения на длине волны 10.7 см F10.7. Для модели IRI зависимости амплитуды суточных вариаций от уровня солнечной активности не наблюдается.

## 5. Заключение

В настоящей работе были проанализированы параметры суточных вариаций ПЭС, по данным различных лабораторий и моделирования. Существует систематическое отличие по амплитуде вариаций и скорости роста ионизации для карт различных лабораторий. Кроме того, широко используемая модель ионосферы IRI не отражает влияние солнечной активности на амплитуду суточных вариаций.

## Благодарности

Мы выражаем благодарность научным группам JPLG, UPCG, ESAG, CODG за данные карт ПЭС. Работа поддержана Фундаментальной исследовательской программой физического отделения РАН (Проект IV.12 “Современные проблемы радиофизики”), грантом РФФИ 10-05-00113-а.

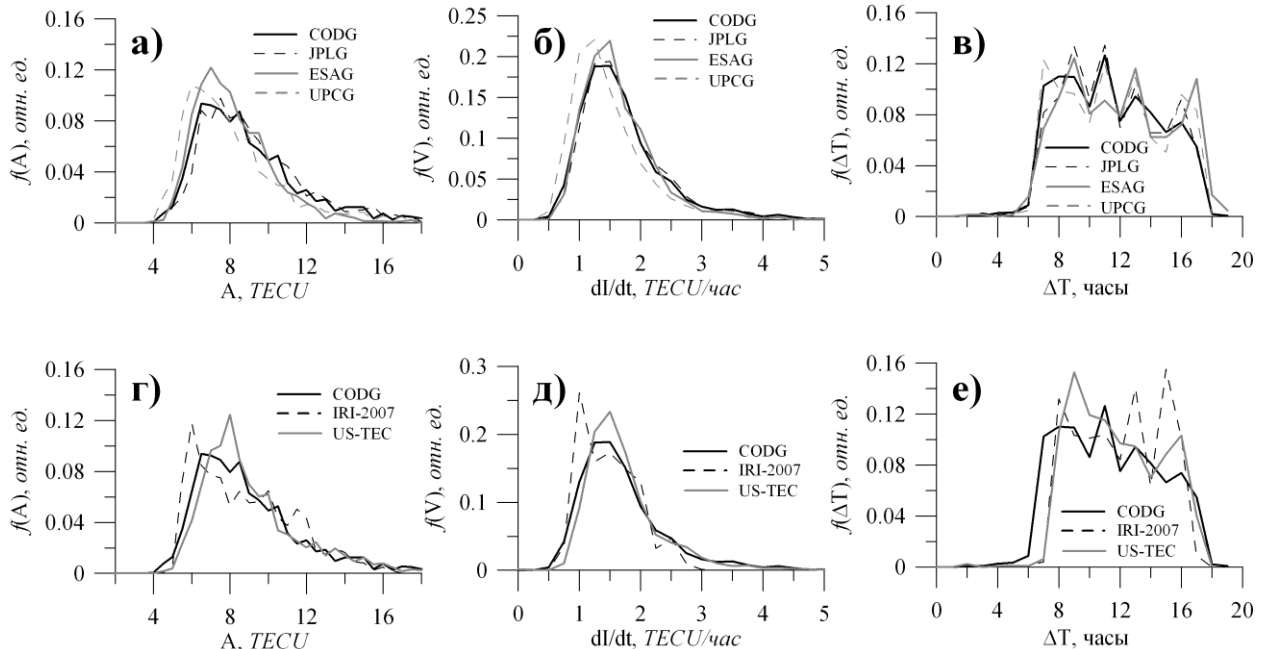


Рис. 3 – Статистическое распределение амплитуды, полуширины, и скорости роста ионизации суточных вариаций

15 октября 2004 г. - 1 января 2009 г.

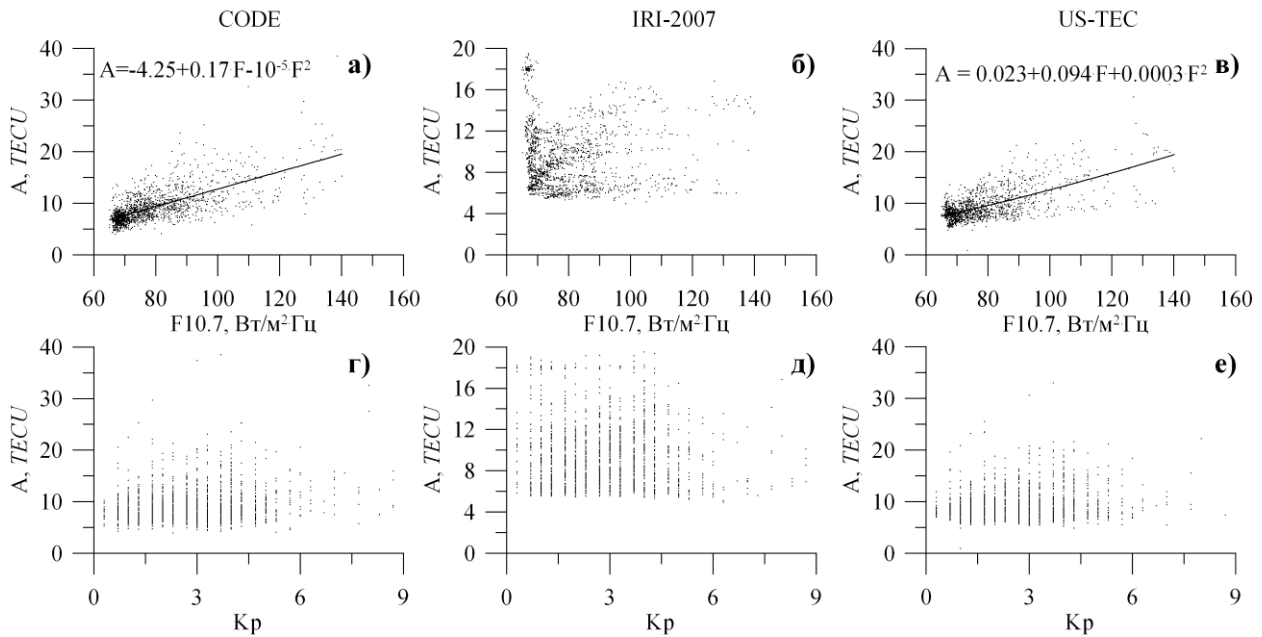


Рис. 4 – Зависимость параметров суточных вариаций ПЭС от уровня солнечной и геомагнитной активности

#### Литература

9. Mannucci A.J., Wilson B.D., Yuan D.N., Ho C.M., Lindqwister U.J., Runge T.F. A global mapping technique for GPS derived ionosphere TEC measurements // Radio Sci. 1998. V. 33. № 3. P. 565–582.
10. Schaer S., Beutler G., Rothacher M. Mapping and predicting the ionosphere // Proc. IGS AC Workshop. Darmstadt, Germany. February 9–11. 1998. P. 307–320.
11. US-TEC Technical Document. Available from [www.swpc.noaa.gov/ustec/docs/USTEC\\_TechnicalDocument.pdf](http://www.swpc.noaa.gov/ustec/docs/USTEC_TechnicalDocument.pdf)
12. Bilitza D., Reinisch B.W. International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters // Adv. Space Res. 2008. V. 42. P. 599-609
13. Wilson B.D., Mannucci A.J., Edwards C.D. Subdaily northern hemisphere maps using the IGS GPS network // Radio Sci. 1995. V. 30. P. 639-648.