

## ИЗМЕНЕНИЯ В ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ ИОНОСФЕРЕ ВО ВРЕМЯ СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ БУРЬ

### CHANGES IN THE EQUATORIAL IONOSPHERE DURING STRONG GEOMAGNETIC STORMS

*Э.И. Астафьева<sup>1</sup>, П.В. Татаринов<sup>1</sup>, К.С. Паламарчук<sup>2</sup>*

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

<sup>2</sup>*Department of Mineral Resources Engineering, Technical University of Crete,  
73100, Chania, Crete, Greece.*

Ionosphere response to the strongest geomagnetic storms on September 7-8, 2002 and November 20-21, 2003 was analyzed using the data of global ionosphere maps, altimeter data from the Jason-1 and TOPEX satellites and the data of GPS receivers on board CHAMP and SAC-C satellites. It is shown that after the interplanetary magnetic field turns southward and intensifies, the crests of the equatorial ionization anomaly (EIA) travel poleward and TEC value within the EIA area increases significantly (up to 120-180 TEC units). GPS data from SAC-C satellite show that during the main phase of geomagnetic storms TEC value from the altitude of 705 km up to the GPS satellite orbit is 2-3 times higher than during undisturbed conditions. These effects of dayside ionospheric uplift occur owing to the «super-fountain effect» [9] and last few hours while the enhanced interplanetary electric field impinge on the magnetopause.

#### 1. Введение

Исследованию отклика ионосферы на геомагнитные возмущения посвящено немало работ [2, 3, 4, 7, 10]. Основное внимание исследователей было сосредоточено на ионосфере средних и высоких широт, поэтому наши знания о развитии ионосферной бури в области экваториальной аномалии (ЭА) все еще недостаточны [2]. Между тем, процессы в ЭА представляют огромный интерес для геофизики, т.к. служат индикатором взаимодействий солнечного ветра, магнитосферы и ионосферы.

Во время главной фазы магнитных бурь, когда вектор  $V_z$  межпланетного магнитного поля (ММП) приобретает южное направление, проникающие в низкоширотную ионосферу межпланетные электрические поля приводят к усилению электрических полей восточного направления [2, 7, 9]. Усиленный таким образом электродинамический дрейф ( $\mathbf{E} \times \mathbf{V}$ ) приводит к подъему ионосферной плазмы до высот 800-1000 км над экватором. Дрейфуя вдоль магнитных силовых линий, наклон которых увеличивается по мере удаления от геомагнитного экватора, эта плазма достигает значений магнитной широты  $\pm 30^\circ$  (дневной «супер-фонтан-эффект» [9, 10]). Фотоионизация нижней F-области ионосферы производит «новую» плазму, которая возмещает поднятую вверх под действием ( $\mathbf{E} \times \mathbf{V}$ ) дрейфа, что приводит к увеличению полного электронного содержания (ПЭС) [9].

Явление «супер-фонтан-эффекта» было впервые подтверждено экспериментально для магнитной бури 5-6 ноября 2001 г в [9]. Одновременно с повышением ионизации во время магнитных бурь наблюдалось также значительное (до  $10^\circ$ ) смещение гребней ЭА в полярном направлении [3, 7, 9, 10].

Однако к настоящему времени проведено недостаточно исследований, в которых описанные явления были зарегистрированы одновременно. Целью данной работы является анализ отклика ионосферы на магнитные бури 7-8 сентября 2002 г. и 20-21 ноября 2003 г. с одновременным использованием данных спутниковых высотометров TOPEX и Jason-1, GPS-измерений ПЭС на ИСЗ CHAMP и SAC-C, а также данных глобальных ионосферных карт ПЭС.

## 1. Методы обработки данных

Глобальные ионосферные карты (GIM) содержат данные вертикального ПЭС с пространственным разрешением  $2.5^\circ$  по широте и  $5^\circ$  по долготе («ячейка» GIM). Временное разрешение составляет 2 часа. Технология вычисления карт по данным глобальной сети станций GPS и подробно описана в работах [6, 8].

Двухчастотные спутниковые высотомеры TOPEX и Jason-1 предоставляют 1-с измерения вертикального ПЭС от водной поверхности на Земле до высоты 1330 км [5, [http://www.aviso.oceanobs.com/html/missions/welcome\\_uk.html](http://www.aviso.oceanobs.com/html/missions/welcome_uk.html)]. Параметры орбиты приведены в Таблице 1. Основное назначение высотомеров - измерение высоты поверхности океана, данные при пролетах над сушей не могут быть использованы для восстановления ПЭС. Данные высотомеров оказывают неоценимую помощь при наблюдениях в тех местах, где наземных средств наблюдения за ионосферой недостаточно, например, над океанами.

CHAMP является проектом геофизической обсерватории GFZ в Потсдаме (<http://op.gfz-potsdam.de/champ>), спутник перемещается практически на высоте главного максимума ионосферы (Таблица 1) в меридиональном направлении, что позволяет оценить вклад ПЭС верхней ионосферы во всем диапазоне широт. Метод определения ПЭС по данным бортового приемника GPS описан в [1].

SAC-C является совместным проектом США, Аргентины, Бразилии, Дании, Италии и Франции (<http://www.gsfc.nasa.gov/gsfcservice/gallery/factsheets/spacesci/sac-c.html>). Высота орбиты спутника составляет 705 км (Таблица 1), поэтому GPS данные SAC-C позволяют оценить ПЭС в интервале высот от 705 км до 20200 км.

Таблица 1. Параметры орбит спутников TOPEX, Jason-1, CHAMP, SAC-C.

Спутник	Высота орбиты, км	Наклонение орбиты	Период обращения, мин
TOPEX	1336	$66^\circ$	112
Jason-1	1330	$66^\circ$	112
CHAMP	430÷350*	$87^\circ$	91
SAC-C	705	$98^\circ$	99

\* - высота орбиты спутника CHAMP менялась с 430 км в 2001 году до 350 км в 2005 году

## 3. Отклик ионосферы на геомагнитные возмущения 7-8 сентября 2002 г. и 20-21 ноября 2003 г.

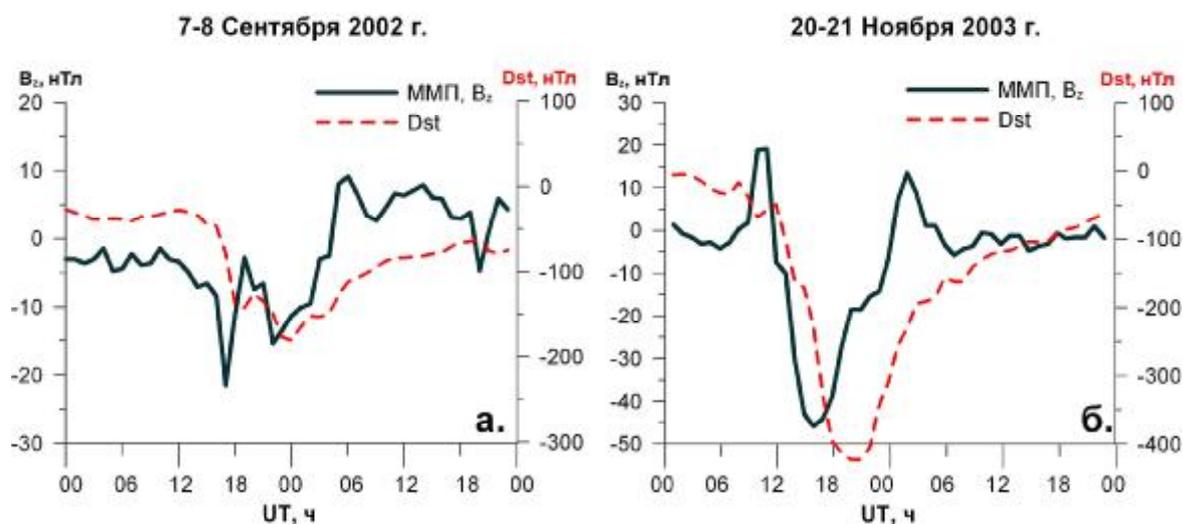


Рис.1. Изменения вектора  $B_z$  ММП (в координатах GSM) и индекса геомагнитной активности Dst во время магнитных бурь: а) 7-8 сентября 2002г.; б) 20-21 ноября 2003 г.

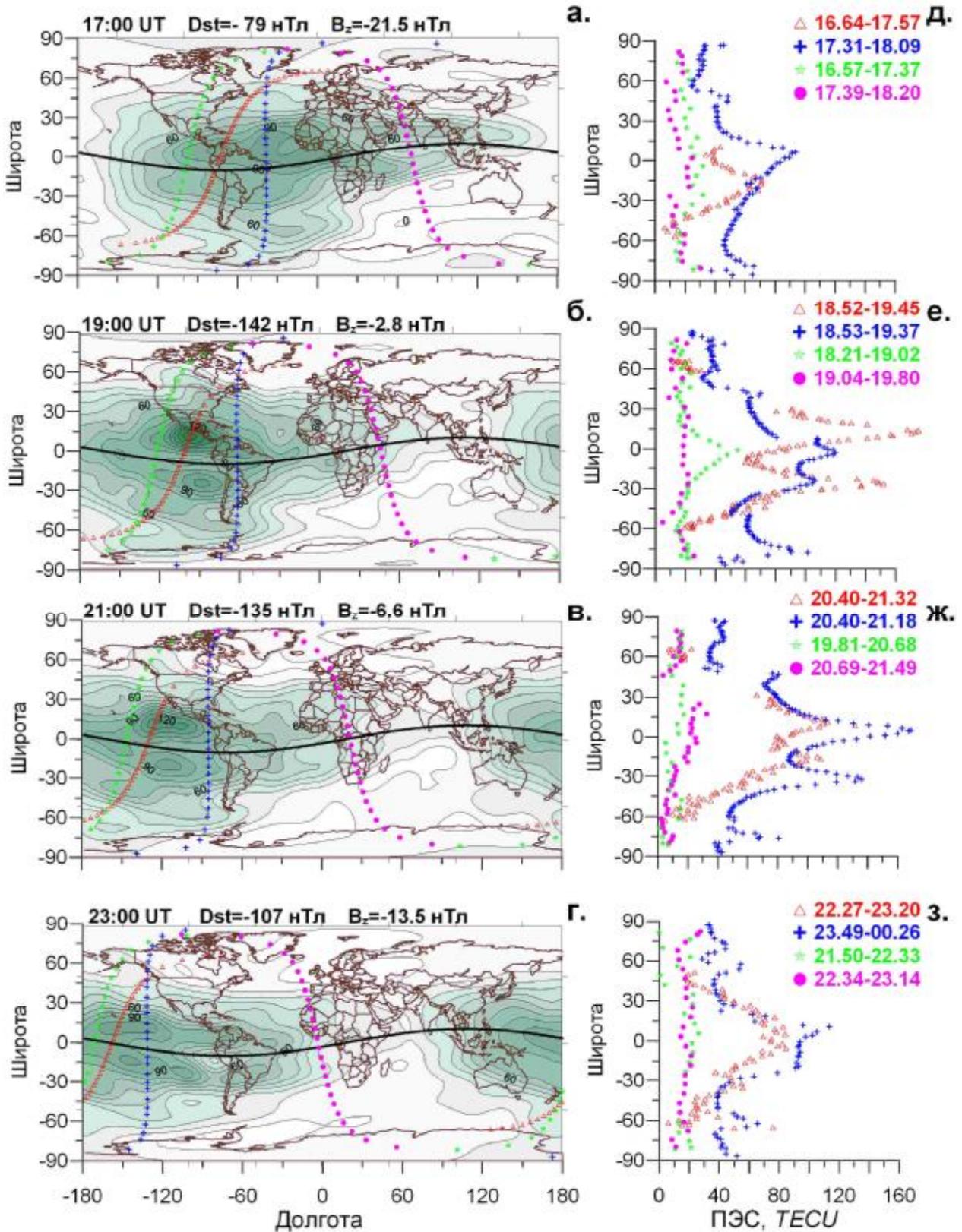


Рис.2. Изменения ПЭС 7-8 сентября 2002г. с 17:00 до 23:00 UT по данным GIM (а-г) и по данным измерений ПЭС на спутниковом высотометре Jason-1 (треугольники) и на спутниках CHAMP (крестики) SAC-C (звездочки и кружочки). Траектории пролетов спутников обозначены на панелях а-г.

Z-компонента вектора ММП во время магнитной бури 7-8 сентября характеризуется резкими скачкообразными изменениями от -22 до -2 нТл с 17 до 19 UT, и затем до -15 нТл к 22 UT (рис. 1а). Минимальное значение индекса Dst составляет 181 нТл к 00 UT 8

сентября. Изменение направления вектора  $V_z$  ММП, а также увеличение его абсолютного значения с 5 нТл в 12 UT до -46 нТл в 15 UT 20 ноября вызвало сильнейшую магнитную бурю с последующим уменьшением индекса геомагнитной активности Dst до -422 нТл в 20:00 UT (рис.16).

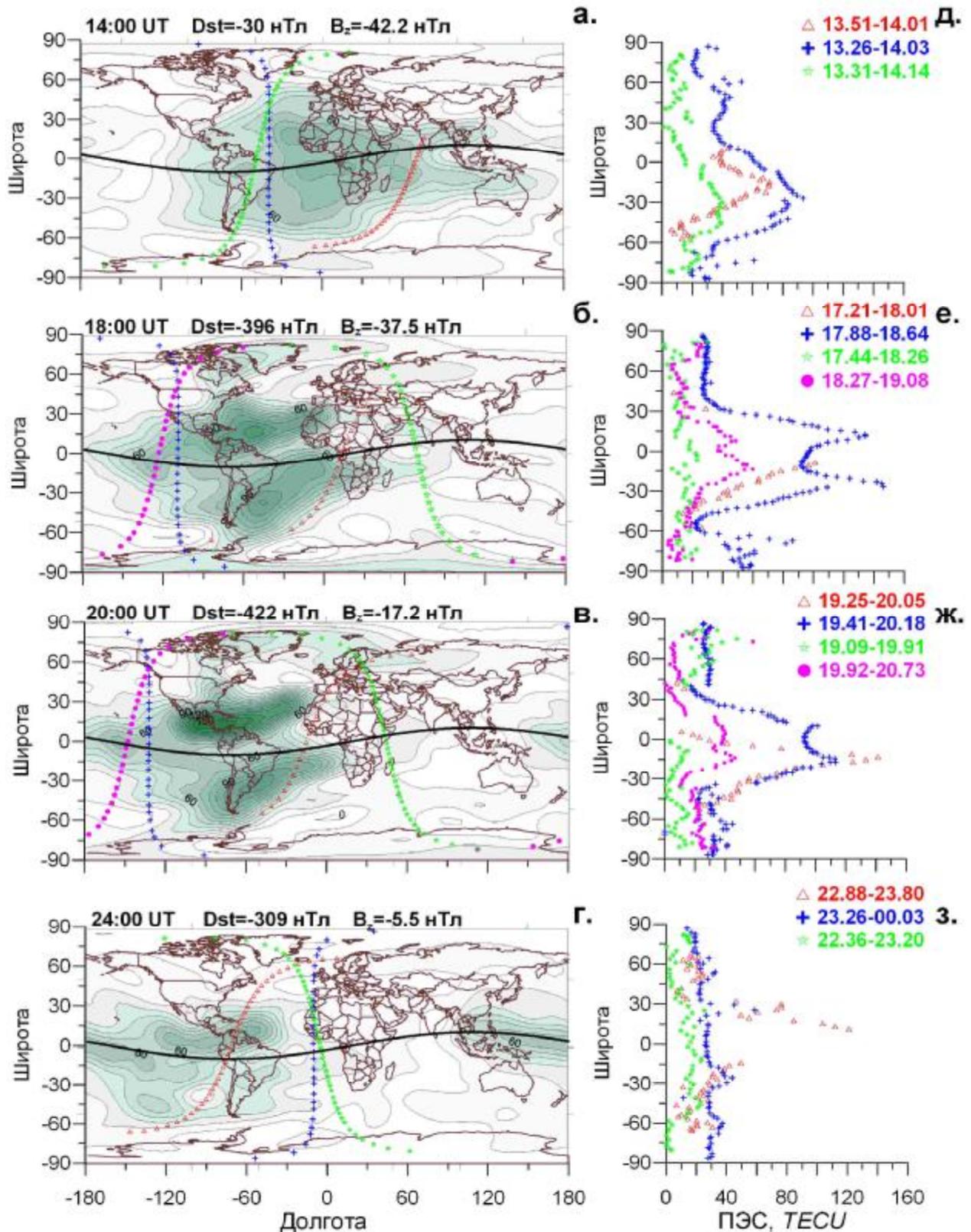


Рис.3. Изменения ПЭС 20 ноября 2003 г. с 14:00 до 24:00 UT по данным GIM (а-г) и по данным измерений ПЭС (д-з) на спутниковом высотометре TOPEX (треугольники), на спутниках CHAMP (крестики) и SAC-C (звездочки и кружочки).

На рис. 2, 3 а-г представлены глобальные карты вертикального ПЭС, на рис.2, 3 д-з

показаны значения ПЭС, измеренные с помощью CHAMP и SAC-C. Кроме того, для магнитной бури 2002 г. представлены измерения ПЭС, полученные с высотомера Jason-1; для магнитной бури 20-21 ноября 2003 г. – с высотомера TOPEX.

После резких изменений направления и величины вектора  $B_z$  ММП значение вертикального ПЭС над экватором возросло до 90-100 TECU к 17 UT 7 сентября 2002 г. (рис. 2 а, д) и до 80-90 TECU к 14 UT 20 ноября 2003 г. (рис. 3 а, д.). Дальнейшее уменьшение значения  $B_z$  привело к формированию двух гребней ЭА и их смещению в сторону полюсов от геомагнитного экватора. Одновременно с этим, значение ПЭС в гребнях увеличилось до 120-140 TECU по данным GIM (рис. 2б, 3б) и до 150-180 TECU по данным спутниковых измерений, траектории которых проходили вблизи центров гребней ЭА (рис. 2б,е и 3б,е). Особое внимание следует обратить на данные измерений спутника SAC-C (рис. 2 е, ж и 3 е, ж): значение ПЭС выше 705 км увеличилось до 45-50 TECU к 18 UT 7 сентября 2002 г. (рис. 2е) и до 50-60 TECU к 19 UT 20 ноября 2003 г (рис. 3е) при пролетах над экваториальной областью, что в 2-3 раза больше, чем в спокойных условиях.

На рис. 2 и 3 видно, что, несмотря на то, что характер изменений в ПЭС одинаков, для магнитной бури 20-21 ноября 2003 г. характерны более высокие значения ПЭС в гребнях ЭА, и большее расстояние их смещения от геомагнитного экватора. Этот процесс продолжается несколько часов; затем наступает стадия восстановления области ЭА.

На восстановительной стадии магнитной бури наблюдается смещение гребней ЭА ближе к геомагнитному экватору (до  $\pm 15^\circ$  геомагнитной широты, что соответствует положению гребней в магнитоспокойных условиях), а также уменьшение ПЭС (рис. 2 г, з и рис.3 г,з).

#### 4. Заключение

Использование данных спутниковых высотометров TOPEX и Jason-1, GPS-измерений ПЭС на ИСЗ CHAMP и SAC-C, а также данных глобальных ионосферных карт ПЭС позволило нам получить «трехмерную» визуализацию процесса перераспределения ионосферной плазмы – по широте, долготе и высоте.

Наиболее важным результатом анализа данных для магнитных бурь 7-8 сентября 2002 г. и 20-21 ноября 2003 г. является заметное увеличение ПЭС по измерениям спутника SAC-C, означающее подъем ионосферной плазмы выше 705 км вследствие дневного «супер-фонтан-эффекта». Кроме того, после резких изменений  $B_z$  ММП происходит увеличение ПЭС в гребнях ЭА. При этом гребни ЭА смещаются в сторону полюсов на расстояние порядка 5-10 градусов широты. Эти результаты согласуются с данными предыдущих исследований [3, 7, 10] и представляют ясно выраженное и убедительное экспериментальное подтверждение модели «супер-фонтан эффекта» [9].

Следует отметить, что карты GIM в целом хорошо отражают глобальную динамику ионосферной плазмы во время магнитных бурь. Однако, в моменты наиболее резких и глубоких изменений в магнитосфере и ионосфере в экваториальной области наблюдаются заметные отличия значений вертикального ПЭС, вычисленных по GIM от данных спутников CHAMP, SAC-C и спутниковых высотометров TOPEX Jason-1.

#### Благодарности

Авторы благодарны проф. Э.Л. Афраймовичу за интерес к работе и ценные замечания. Авторы благодарят сотрудников лаборатории CODE (<http://www.aiub.unibe.ch/ionosphere.html>) за глобальные ионосферные карты вертикального ПЭС.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 07-05-00127).

## Список литературы

1. Афраимович Э.Л., Татаринцев П.В. Восстановление полного электронного содержания по данным двухчастотного GPS-приемника, установленного на борту низкоорбитального искусственного спутника Земли // Электронный журнал «Исследовано в России», 2005, <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2005/042.pdf>.
2. Abdu M.A., Sobral J.H.A., E.R. de Paula, Batista I.S. Magnetospheric disturbance effects on the Equatorial Ionization Anomaly: an overview // J. Atm. Terr. Phys. 1991. Vol.53, N8. 757-771.
3. Astafyeva E.I., Afraimovich E.L., Kosogorov E.A. Dynamics of total electron content distribution during strong geomagnetic storms // Advances in Space Research. 2007. DOI:10.1016/j.asr.2007.03.006 (Article in press)
4. Foster, J.C and Rideout, W. Midlatitude TEC enhancements during the October 2003 superstorm // Geophys. Res. Letters. 2005. V.32, 12, DOI 10.29/2004GL02719.
5. Fu, L.L., E.J. Christensen, C.A. Yamarone Jr., M. Lefebvre, Y. Menard, M. Dorrer and P. Escuder. TOPEX/Poseidon mission overview // J. Geophys. Res. 1994. V.99. P. 24396-24381.
6. Mannucci, A.J., Wilson, B.D., Yuan, D.N., Ho, C.M., Lindqwister, U.J. and Runge T.F. A global mapping technique for GPS-driven ionospheric TEC measurements // Radio Science. 1998.V.33. P.565-582.
7. Mannucci, A.J., Tsurutani, B.T., Iijima, B.A., Komjathy, A, Saito, A., Gonzalez, W.D., Guarnieri, F.L., Kozyra, J.U. and Skoug, R. Dayside global ionospheric response to the major interplanetary events of October 29-30, 2003 “Halloween Storms”// Geophys. Res. Letters. 2005. V.32, 12, DOI 10.29/2004GL021467.
8. Schaer, S., Beutler, G., Rothacher, M. Mapping and predicting the ionosphere // Proceedings of the IGS AC Workshop, Darmstadt, Germany, February 9-11, 307-320, 1998.
9. Tsurutani, B., Mannucci A., Iijima, B., Abdu, M.A., Sobral, J.H.A., Gonzalez, W., Guarneri, F., Tsuda, T. et al. Global dayside ionospheric uplift and enhancement associated with interplanetary electric fields // J. Geophys. Res. 2004. V.109, A08302.
10. Zhao B., Wan W., Liu L. Responses of equatorial anomaly to the October-November 2003 superstorms // Ann. Geophys. 2005. V.23. P.693-706.