

**ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ  
В F-ОБЛАСТИ И ВНЕШНЕЙ ИОНОСФЕРЕ НА СРЕДНИХ И НИЗКИХ ШИРОТАХ  
В ПЕРИОД 22–29 СЕНТЯБРЯ 2011 г.**

<sup>1,2</sup>И.А. Носиков, <sup>2</sup>М.В. Клименко, <sup>2</sup>В.В. Клименко, <sup>3</sup>В. Трухлик

**FEATURES OF THE ELECTRON DENSITY BEHAVIOR IN THE F-REGION  
AND OUTER IONOSPHERE AT MIDDLE AND LOW LATITUDES DURING  
22–29 SEPTEMBER 2011**

<sup>1,2</sup>I.A. Nosikov, <sup>2</sup>M.V. Klimenko, <sup>2</sup>V.V. Klimenko, <sup>3</sup>V. Truhlik

Представлен анализ данных измерений ионосферных параметров ионозондом и радаром некогерентного рассеяния (РНР) в Jicamarca (Перу) в спокойных условиях и во время геомагнитных бурь 22–29 сентября 2011 г. Оценен вклад ионосферы в полное электронное содержание (TEC) по данным РНР. Данные наблюдений сравниваются с результатами расчетов по модели GSM ТИП. Выделены особенности поведения электронной концентрации  $N_e$  в экваториальной ионосфере и, в частности, F3-слоя. Получено согласие результатов модельных расчетов и данных наблюдений в спокойных условиях и во время геомагнитной бури.

The analysis of the ionosonde and incoherent scatter radar (ISR) data of ionospheric parameters at Jicamarca (Peru) in quiet conditions and during geomagnetic storms on 22–29 September 2011. The estimation of the ionosphere contribution to the Total Electron Content (TEC) according to ISR. These observations are compared with GSM TIP model calculation results. The features of the behavior of the electron density  $N_e$  in the equatorial ionosphere and, in particular, F3 layer, were identified. The consent of the model calculation results with observations was obtained in quiet conditions and during geomagnetic storms.

**Введение**

Анализ данных измерений ионосферных параметров ионозондом и РНР в Jicamarca (Перу) позволяет описать поведение экваториальной ионосферы во время геомагнитных бурь 22–29 сентября 2011 г. (на рис. 1 показано поведение в этот период индексов геомагнитной активности  $D_{st}$  и  $K_p$ ) и сравнить их с результатами расчетов по модели GSM ТИП [Namgaladze et al., 1988]. Ранее с использованием этой модели были проведены расчеты поведения различных ионосферных параметров во время геомагнитных бурь в апреле 2000, октябре 2003 г., ноябре 2003 и 2004 г., сентябре 2005 г., мае 2010 г. [Klimenko et al., 2011; Sahai et al., 2011; Klimenko, Klimenko, 2012]. В этих же работах можно найти описание постановки задачи моделирования, которой мы воспользовались и в данной работе. Несколько станций на низких и средних широтах были выбраны для проведения сравнения результатов модельных расчетов с данными наблюдений. Это сравнение в целом выявило удовлетворительное согласие результатов расчетов с наблюдательными данными. Из-за ограниченного объема статьи мы приводим такое сравнение только для станции Jicamarca и показываем пример рассчитанного по модели GSM ТИП глобального распределения некоторых ионосферных параметров в спокойных условиях и во время бури.

**Данные измерений и результаты модельных расчетов**

На рис. 2 представлены вертикальные профили  $N_e$  в различные моменты времени, полученные по данным РНР в Jicamarca в спокойных условиях и по результатам расчетов по модели GSM ТИП как в спокойных условиях (24 сентября), так и в главную (26 сентября) и восстановительную (29 сентября) фазы геомагнитной бури.

Из сравнения двух верхних графиков на рис. 2, а видно, что в 00:00 UT данные наблюдений и резуль-

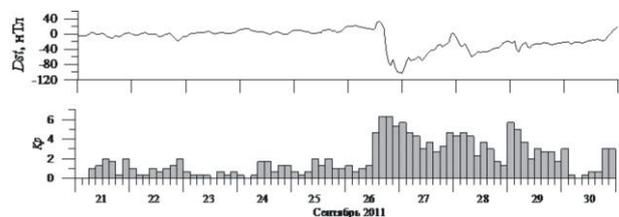


Рис. 1. Поведение индексов геомагнитной активности  $D_{st}$  и  $K_p$  в сентябре 2011 г.

таты расчетов заметно отличаются. Максимум  $N_e$  рассчитанного профиля в два раза превышает значение максимума по данным РНР, и он расположен на высоте ~350 км, что на 170 км ниже, чем по данным РНР. Профили для 04:00 UT очень похожи. Модельный профиль для 06:00 UT согласуется с экспериментальным по высоте максимума, но в ~2 раза меньше по значению. Профили для 08:00, 10:00 и 12:00 UT наилучшим образом согласуются по значениям максимума. Высоты максимумов в 08:00 и 12:00 также удовлетворительно согласуются. В 12:00 UT результаты модельных расчетов показывают формирование F3-слоя на высоте ~420 км. Его максимум превышает максимум F2-слоя, высота которого удовлетворительно согласуется с высотой максимума слоя по данным РНР. Отметим также, что по данным РНР, как и по модельным расчетам, в 04:00–08:00 UT и в 12:00 UT формируется F3-слой, максимум которого меньше максимума F2-слоя, а высота его по модели GSM ТИП меньше, чем по данным РНР.

На рис. 2, б показаны профили  $N_e$  для 08:00–19:00 LT (местное время для Jicamarca LT=UT–05). Общим для них является то, что максимумы профилей по модели GSM ТИП больше максимумов по данным РНР и на всех виден по крайней мере один дополнительный слой – F3-слой.

Одной из отличительных особенностей экваториальной ионосферы является наличие дополнительно F3-слоя. Согласно модельным расчетам F3-слой

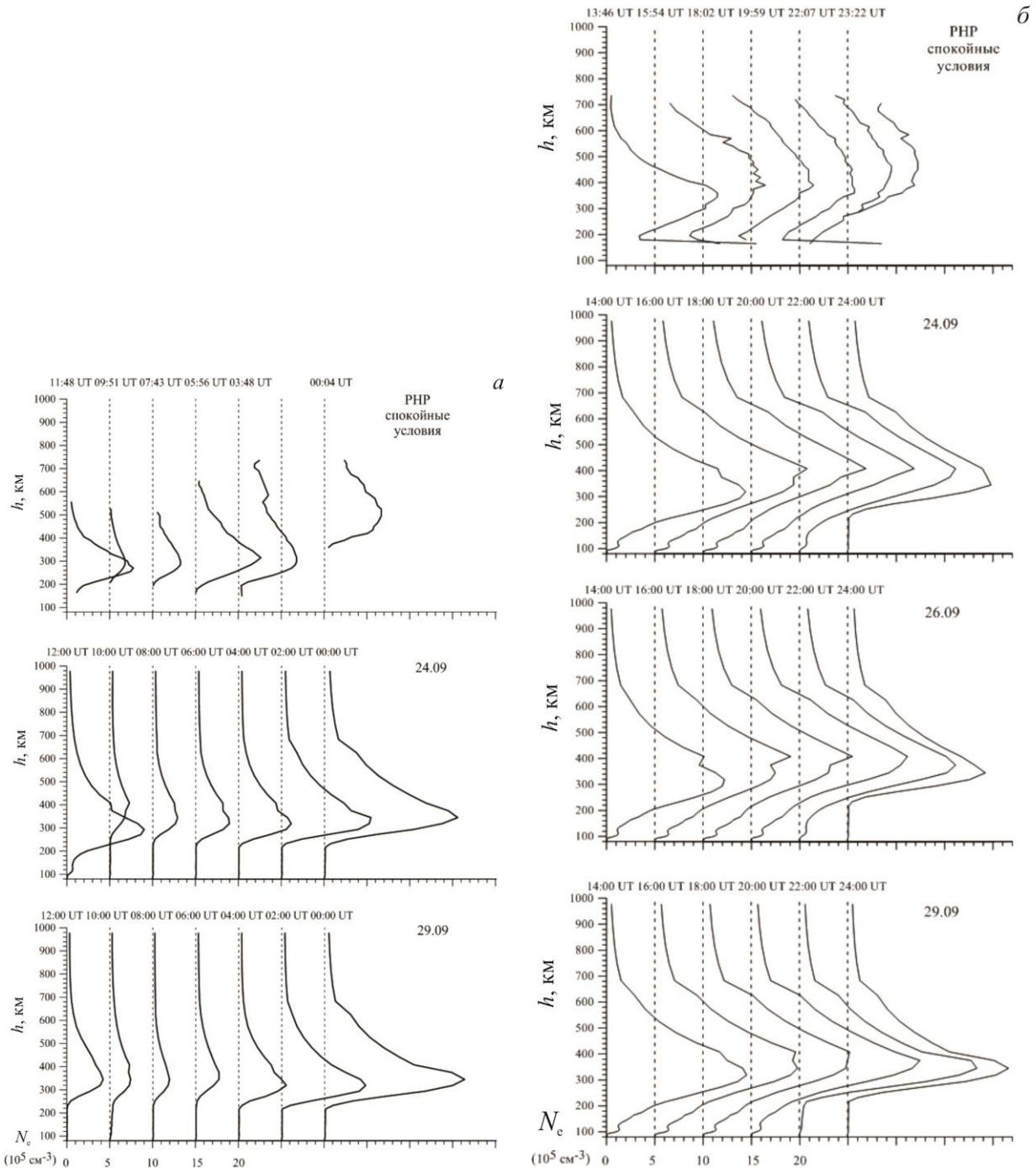


Рис. 2. Вертикальные профили  $N_e$  над Lisamarca в сентябре 2011 г. с 00:00 UT до 12:00 UT. Вверху – данные измерений РНР в спокойных условиях, ниже – результаты расчетов по модели ГСМ ТИП в спокойных условиях (24.09) и во время бури (29.09) (а). То же для 13:00–24:00 UT. Буря 26.09 и 29.09. (б).

появляется выше максимума F2-слоя на высотах  $\geq 400$  км. В отдельные моменты времени этот слой может стать главным, когда его максимум превысит максимум F2-слоя, что позволит его обнаружить при зондировании снизу. В остальные моменты времени, когда F3-слой существует и  $foF3 < foF2$ , он не виден при наземном зондировании и его обнаружение становится сложной задачей, поскольку в этом случае его можно увидеть только при зондировании ионосферы со спутников и с помощью РНР, данными измерений которого мы воспользовались в настоящей работе. На

рис. 2, а F3-слой на профилях  $N_e$  по данным РНР проявляется в виде излома на высотах  $\sim 400$ – $450$  км. Такие изломы видны практически на всех профилях РНР, за исключением профиля для 10:00 UT, который является гладким. Все профили РНР на рис. 2, б либо содержат четкий F3-слой (13:46, 18:02, 19:59 UT), либо сильно неоднородные с многочисленными минимумами и максимумами, один из которых, на высотах  $\geq 410$  км, может быть F3-слоем.

Рассмотрим теперь профили, рассчитанные во время геомагнитной бури. К сожалению, для этого

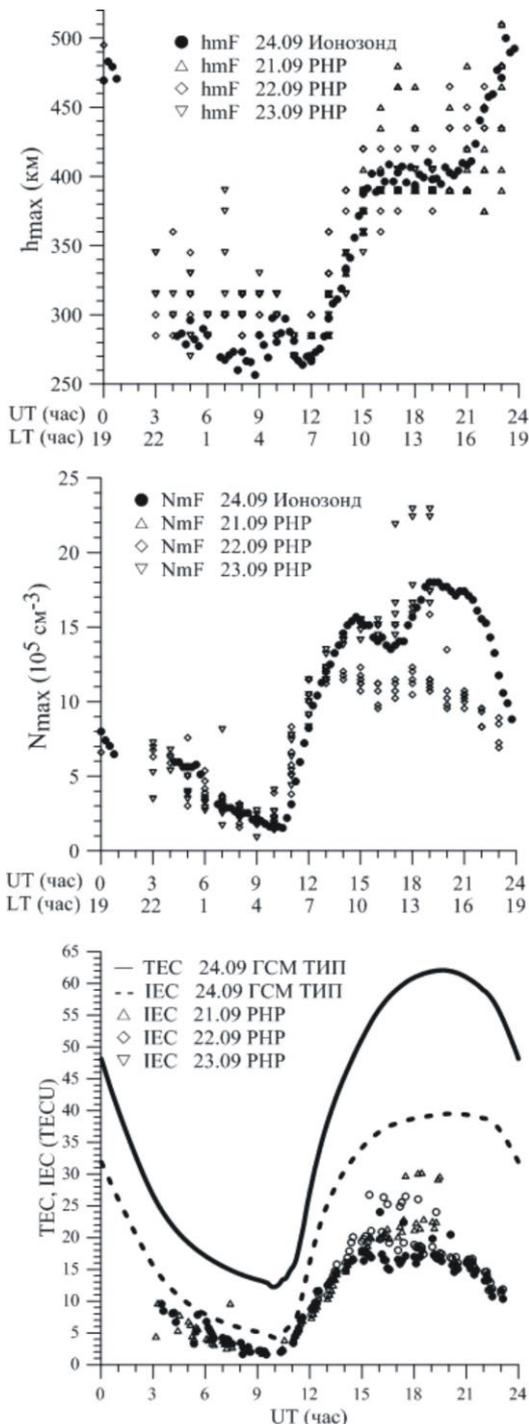


Рис. 3. Суточные вариации  $h_{max}$  (вверху) и  $N_{max}$  (в центре) над Jicamarca по данным ионозонда и РНР в спокойных условиях в сентябре 2011 г. Внизу – суточные вариации IEC, рассчитанного в интервале высот 210–550 км по данным ионозонда и по модели GSM TIIP, а также TEC, рассчитанного по модели GSM TIIP.

периода данные измерений РНР отсутствуют. Сравнивая профили для 24 сентября (спокойный день) и для 26 сентября (активная фаза бури) на рис. 2, б, можно заметить понижения максимума F-области во время бури, т. е. отрицательные ионосферные возмущения. Кроме того, отчетливо видно влияние геомагнитной бури не только на параметры F2-слоя, но и на F3-слой, который становится более четко выраженным и существует более продолжительное время.

На фазе восстановления 29 сентября можно отметить понижение максимума F-области в первой половине дня и повышение во второй половине. Что касается F3-слоя, то можно заметить его ослабление по сравнению с 24 и 26 сентября или даже полное исчезновение.

Из рис. 3 видно, что высоты максимума F-области  $h_{max}$  по данным РНР и ионозонда довольно хорошо согласуются между собой. При этом значения электронной концентрации в максимуме F-области  $N_{max}$  также хорошо согласуются в ночное время, однако дневные значения  $N_{max}$  по данным ионозонда, которые можно считать эталонными, в 1.2–2.0 раза больше, чем по данным РНР. Именно этим объясняются различия между ионосферным электронным содержанием (IEC), рассчитанным по данным РНР и по модели GSM TIIP (из рис. 4 видно, что в спокойных условиях  $N_{max}$ , рассчитанные по модели, хорошо согласуются с данными ионозонда). Таким образом, заниженные значения IEC по данным РНР объясняются неточностью показаний радара в дневное время, что также подтверждают заниженные значения  $N_e$ -профилей, показанных на рис. 2, б в дневное время. Следует заметить, что разница между TEC, рассчитанным по модели GSM TIIP и показанным на этом рисунке, и IEC представляет собой плазмосферное электронное содержание (PEC) над Jicamarca.

Сравнение  $N_{max}$  и  $h_{max}$  по данным ионозонда и результатам модельных расчетов показано на рис. 4. Заметим, что ионозонд дает значения абсолютного максимума F-области. В целом имеется достаточно хорошее согласие, особенно в интервале 12:00–21:00 UT, но имеются и существенные отличия, главным образом в интервалах 21:00–02:00 и 04:00–12:00 UT. На первом из этих интервалов данные наблюдений говорят о наличии F3-слоя, который либо отсутствует в модельных расчетах, либо существует, но  $foF3 < foF2$ . На втором интервале модельные расчеты показывают формирование F3-слоя, тогда как по данным наблюдений он либо отсутствует, либо существует, но  $foF3 < foF2$ .

На рис. 5 показан пример рассчитанных по модели GSM TIIP глобальных карт  $foF$ , IEC, TEC и PEC для спокойных геомагнитных условий в период геомагнитной бури в 20:00 UT 26 сентября. Из этих карт видно, где и какие возмущения вызывает геомагнитная буря в это время.

### Заключение

Показано, что результаты модельных расчетов согласуются с данными наблюдений РНР и ионозонда как в спокойных условиях, так и во время геомагнитной бури. Профили  $N_e$  по данным РНР выявляют существование F3-слоя, формирование которого показывают и модельные расчеты. Показано, что РНР в дневное время дает заниженные значения  $N_{max}$ . Проведены модельные расчеты TEC и IEC над Jicamarca, что позволило оценить вклад протоносферы в TEC.

Авторы выражают искреннюю благодарность В. Zhao, К.Г. Ратовскому и А.Е. Степанову за предоставленные экспериментальные данные и за длительное плодотворное сотрудничество.

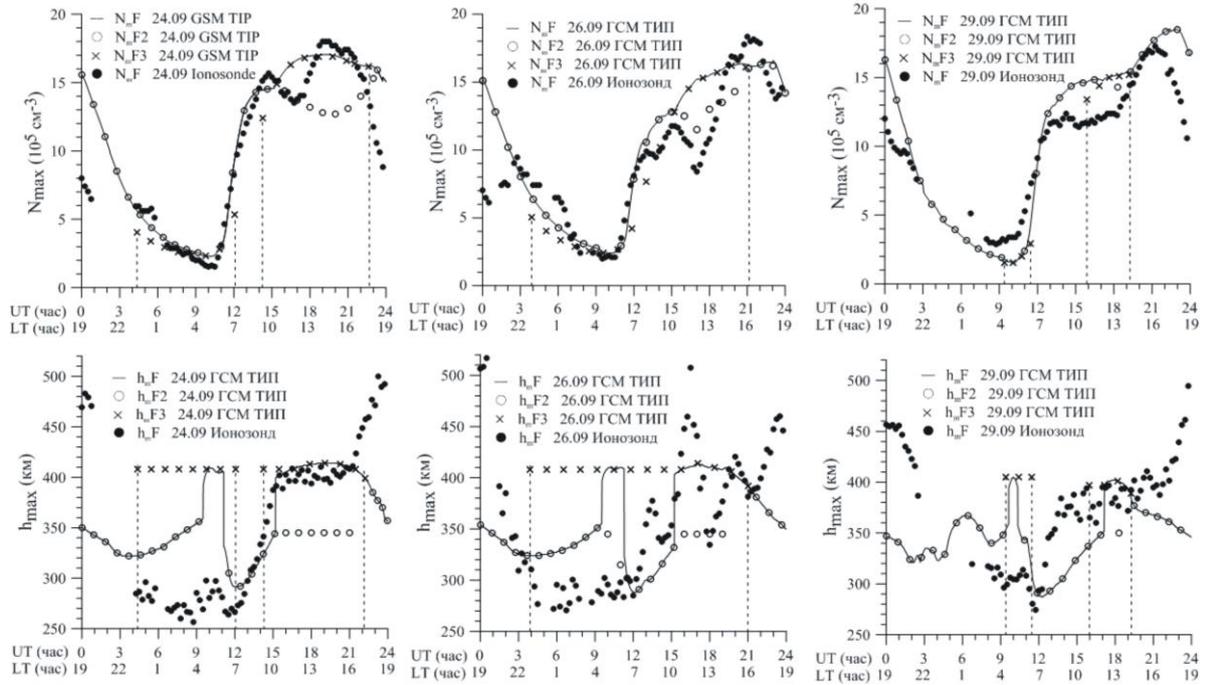


Рис. 4. Суточные вариации  $N_{\max}$  (вверху) и  $h_{\max}$  (внизу) по данным ионозонда и по модели GSM TИП с выделением максимумов F2- и F3-слоев и абсолютного максимума F-слоя в спокойных условиях и во время бури.

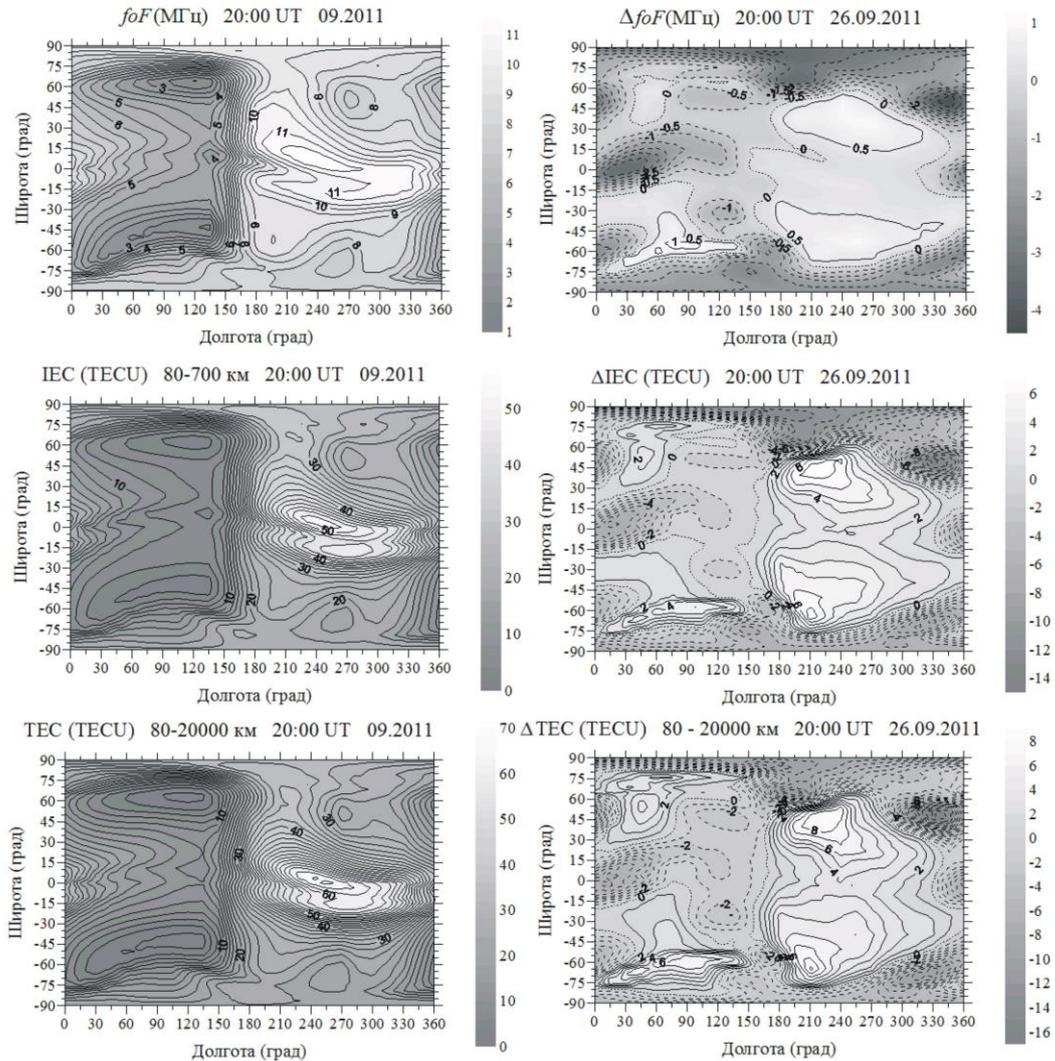


Рис. 5.

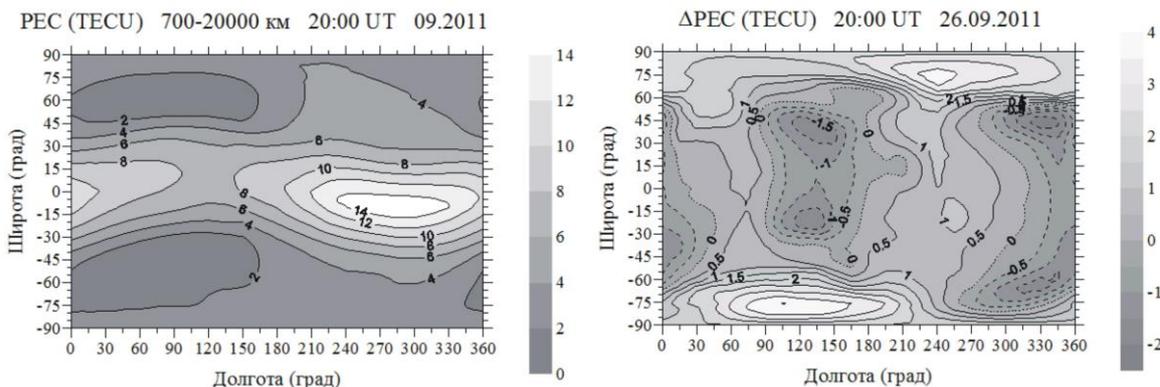


Рис. 5. Рассчитанные по модели ГСМ ТИП глобальные долготно-широтные распределения критической частоты F-слоя  $f_oF_2$ , IES, TEC и PEC для спокойных условий сентября 2011 г. (слева) и возмущения этих параметров в 20:00 UT 26 сентября 2011 г. (справа).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант №12-05-31217, и Программы № 22 РАН.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Klimenko M.V., Klimenko V.V. Disturbance dynamo, prompt penetration electric field and overshielding in the Earth's ionosphere during geomagnetic storm // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2012. V. 90–91. P. 146–155. doi:10.1016/j.jastp.2012.02.018.

Klimenko M.V., Klimenko V.V., Ratovsky K.G., et al. Numerical modeling of ionospheric effects in the middle- and low-latitude F region during geomagnetic storm sequence of 9–14 September 2005 // *Radio Sci.* 2011. V. 46. RS0D03. doi:10.1029/2010RS004590.

Namgaladze A.A., Korenkov Yu.N., Klimenko V.V., et al. Global model of the thermosphere-ionosphere-protonosphere system // *PAGEOPH.* 1988. V. 127. P. 219–254.

Sahai Y., de Abreu A.J., Fagundes P.R., et al. Effects of geomagnetic super storms on the ionospheric F-region in the South American sector using a GPS technique: A review // *Asian J. Phys.* 2011. V. 20, N 4. P. 1–20.

<sup>1</sup>Балтийский Федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия

<sup>2</sup>Западное отделение Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова, Калининград, Россия

<sup>3</sup>Институт физики атмосферы, Прага, Чешская Республика