

УДК 550.388.2

## ЭФФЕКТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

М.В. Клименко, В.В. Клименко

### ELECTRIC FIELD EFFECTS IN THE EARTH'S IONOSPHERE

M.V. Klimenko, V.V. Klimenko

Проведены исследования влияния электрических полей на ионосферу низких и высоких широт в спокойных условиях с использованием численной модели GSM ТИП. Также рассмотрены ионосферные эффекты электрических полей во время модельных суббурь и бурь.

We have examined electric field influence on the low- and high-latitude ionosphere under quiet conditions, using the GSM TIP model. Global ionospheric effects of electric fields during model substorms and geomagnetic storms were also considered.

#### Введение

В F-области ионосферы силовые линии геомагнитного поля заморожены в плазму, дрейфующую под действием электрического поля. Такие явления, как экваториальная аномалия (ЭА), F3-слой и экваториальный электроджет (ЕЕJ) в низких широтах, главный ионосферный провал (ГИП) и авроральные электроджеты (АЕJ) в высоких широтах связаны с действием электрического поля термосферного (динамо-поле) и магнитосферного (поле магнитосферной конвекции) происхождения. Динамо-поле вносит основной вклад в электрическое поле на низких широтах в спокойных условиях.

Во время возмущений поле магнитосферной конвекции может проникать к низким широтам из-за нарушения условий экранирования. В данной работе мы приводим результаты исследования влияния электрических полей на формирование F3-слоя в экваториальной ионосфере, ГИП, дневной и ночной ЭА. Кроме того, моделировались ионосферные эффекты суббурь и бурь. Исследования проводились с помощью Глобальной самосогласованной модели термосферы, ионосферы и протоносферы (GSM ТИП), разработанной в Западном отделении ИЗМИРАН. Модель GSM ТИП, детально описанная в [1], дополнена новым блоком расчета электрического поля и зонального тока в ионосфере Земли [2], который позволяет корректно описывать поведение электрического поля в ионосфере низких и экваториальных широт.

#### Результаты расчетов и обсуждение

Результаты расчетов, представленные в разделах 1 и 2, были получены с использованием модели MSIS-90 [3], а в разделах 3 и 4 – самосогласованным образом без учета термосферных приливов.

##### 1. Влияние электрических полей на формирование F3-слоя в экваториальной ионосфере

В [4] было представлено одно из первых экспериментальных свидетельств расслоения экваториального F2-слоя ионосферы. Пионерскими работами в моделировании расслоения являются [5, 6]. Начиная с некоторого момента термин «расслоение» перестали употреблять для идентификации дополнительного максимума в F-области экваториальной ионосферы.

Вначале его называли G-слоем, а затем – F3-

слоем [7–8]. Существование F3-слоя было предсказано теоретически в [7]. Экспериментальное подтверждение существования F3-слоя представлено на рис. 1. В [7] отмечается, что чаще всего F3-слой появляется на широтах  $\sim 5\text{--}12^\circ$  в области между гребнями ЭА на высоте  $\sim 490$  км с 11:40 до 14:30 LT.

Анализ результатов наших модельных расчетов показал, что расслоение F2-слоя ионосферы происходит и F3-слой над ст. Jicamarca существует с  $\sim 02:40$  до  $\sim 15$  UT (с  $\sim 21:40$  до  $\sim 10$  LT) на высоте  $\sim 420$  км. На рис. 2 показаны рассчитанные в модели GSM ТИП вертикальные профили электронной концентрации над ст. Jicamarca для различных моментов времени. С 09:00 до 11:40 UT концентрация в максимуме F2-слоя меньше, чем в максимуме F3-слоя. А в 12:00 UT максимум F2-слоя становится главным. Несовпадение времен существования F3-слоя в результатах наших расчетов и в [7] связано с фазовым сдвигом зональной компоненты электрического поля, полученной в наших расчетах, относительно использовавшейся в [7].

В [8] показано, что F3-слой формируется благодаря электромагнитному дрейфу (рис. 1). Мы провели исследование влияния электромагнитного дрейфа на формирование F3-слоя (рис. 2) и подтвердили результаты, полученные в [8]. Кроме того, исследовали влияние электрического поля магнитосферного происхождения на F3-слой (рис. 3) и показали, что поле магнитосферной конвекции в отсутствие экранирования приводит к уменьшению значения максимума F2-слоя и практически не изменяет максимум F3-слоя. Экранирование приводит к результатам, очень близким к полученным с учетом только динамо-поля.

##### 2. Влияние электрических полей на формирование ЭА и ГИП

В глобальном распределении электронной плотности на высотах F-области ионосферы наиболее известными крупномасштабными неоднородностями являются ЭА и ГИП. Механизм формирования ЭА, связанный с зональной компонентой электрического поля, был предложен Мартином и получил название фонтан-эффекта. Было предложено несколько механизмов формирования ГИП: за счет области застоя (Кнудсен), недозаполненности плазменных трубок (Кринберг, Тащилин), явления полной тени (Колесник, Голиков), эффекта кольцевого тока (Карпачев).

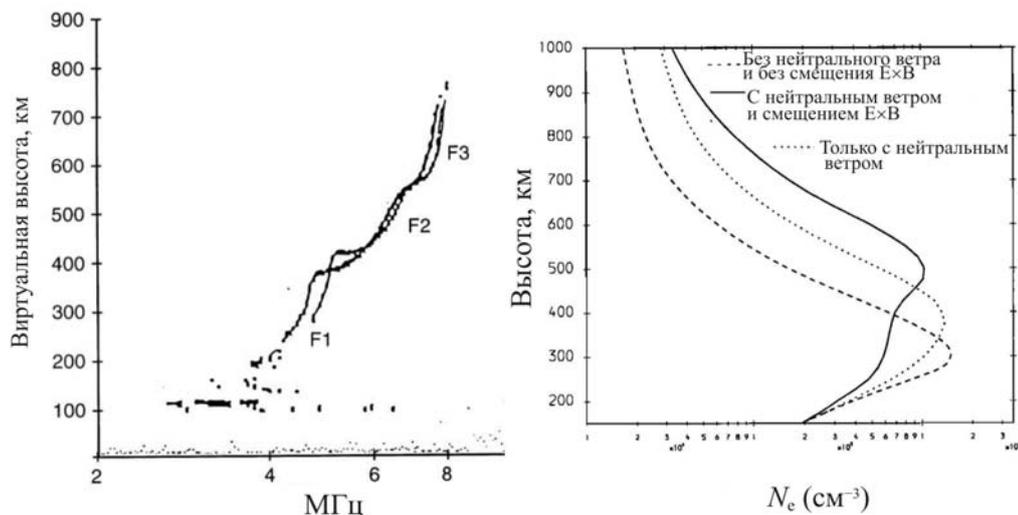


Рис. 1. F3-слой: слева – эксперимент, справа – результаты модельных расчетов [8].

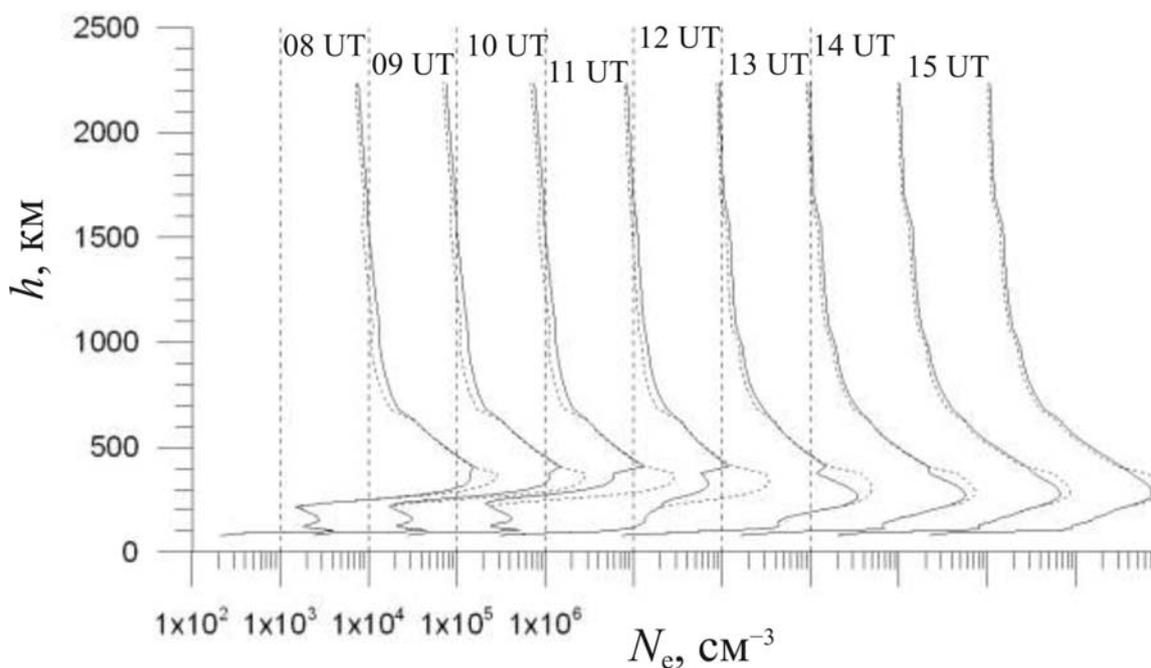


Рис. 2. Рассчитанные профили  $N_e(h)$  над ст. Jicamarca с учетом и без учета  $E \times B$ -дрейфа под действием динамо-поля (сплошные и пунктирные линии).

Нами проведено исследование влияния электрических полей на формирование дневной и ночной ЭА и ГИП. Результаты этого исследования показаны на рис. 4. Видно, что дневная и ночная ЭА формируются меридиональной компонентой  $E \times B$ -дрейфа. Поле магнитосферной конвекции без экранирования приводит к исчезновению ночной ЭА, а экранирование препятствует ее исчезновению. ГИП формируется в отсутствие электрического поля за счет недозаполненности плазменных трубок и высыпаний мягких частиц в авральной зоне. Динамо-поле и поле магнитосферной конвекции завершают формирование ГИП со всеми присущими ему морфологическими особенностями.

### 3. Моделирование ионосферных эффектов суббури

Были проведены расчеты для четырех модельных

суббурь с различными моментами начала. На рис. 5 показано поведение входных параметров модели, а на рис. 6 – рассчитанное поведение амплитуд АЕJ и ЕЕJ во время модельных суббурь. Виден рост амплитуд АЕJ во время суббурь, причем рост западного АЕJ превышает рост восточного, что согласуется с наблюдениями [9]. На экваторе, в основном, суббури вызывают уменьшение амплитуды как восточного, так и западного электроджета.

Во время суббури с началом в 18:00 UT мы обнаружили через 30 мин расслоение ГИП в Южном полушарии (рис. 7). Такое же расслоение ГИП происходит и в Северном полушарии через 6 ч после начала суббури. Расслоения связаны с нестационарной магнитосферной конвекцией и формированием мощного языка ионизации. Экспериментальное подтверждение этого явления представлено в [10].

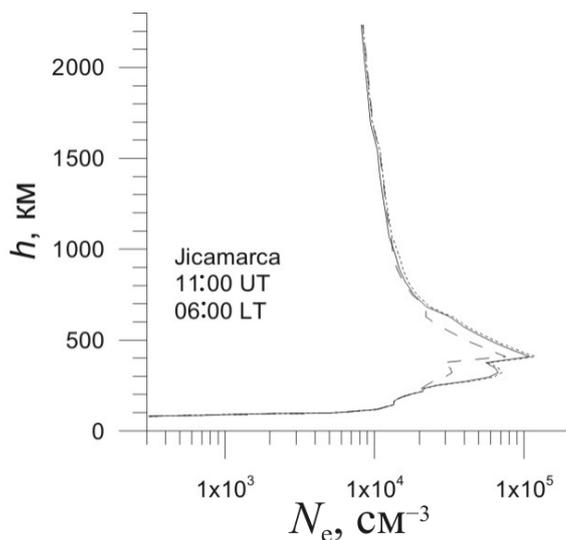


Рис. 3. Результаты модельных расчетов с динамо-полем (пунктирная линия) и с суперпозицией динамо-поля и поля магнитосферной конвекции с учетом и без учета экранирования (сплошная и штриховая линии).

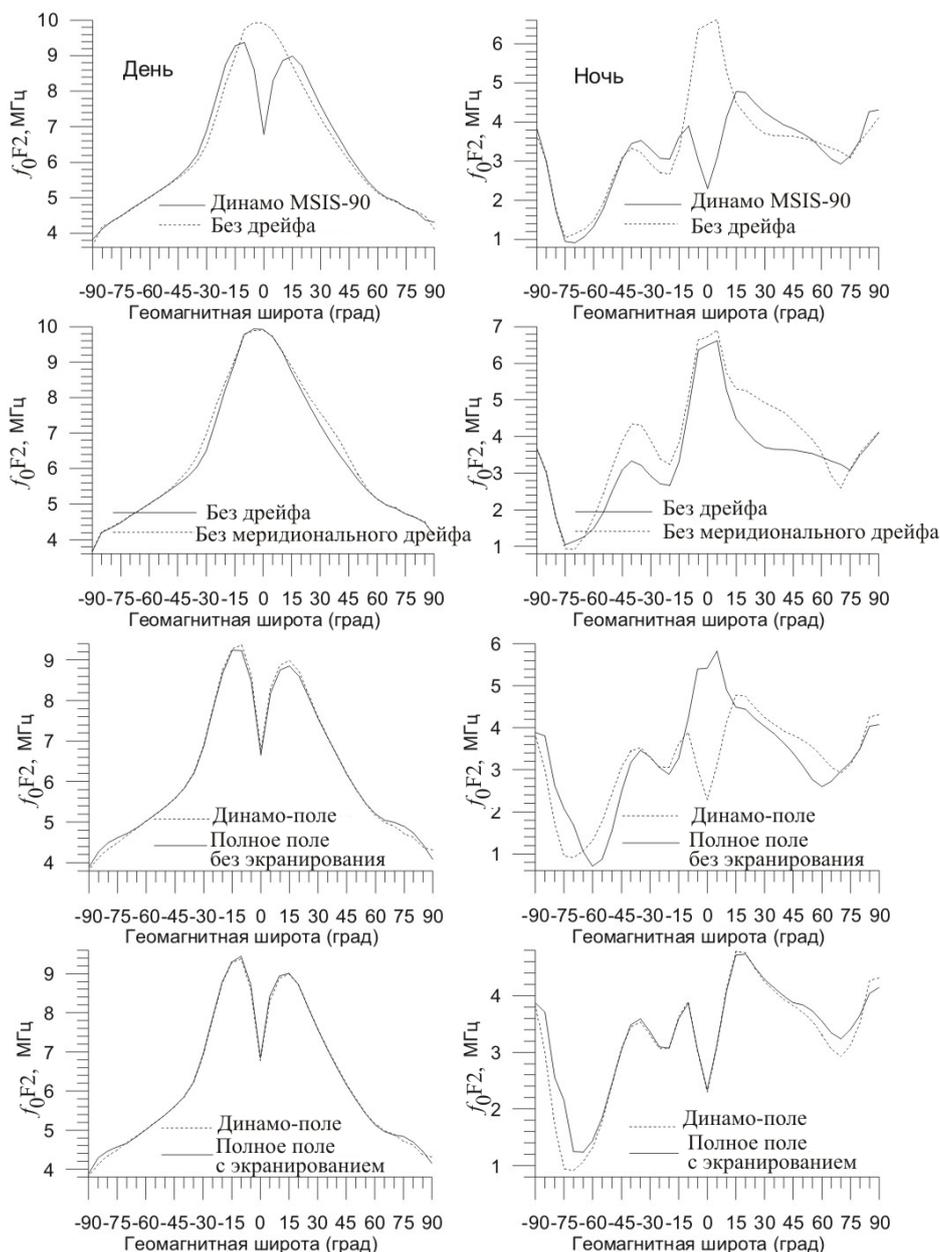


Рис. 4. Роль электрического поля в формировании ГИП и ЭА.

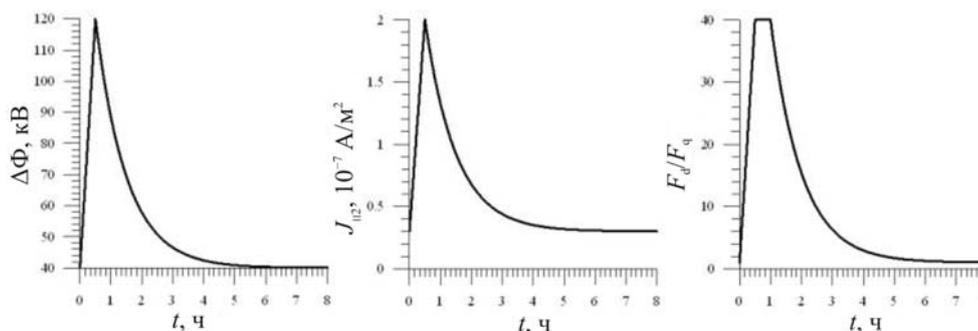


Рис. 5. Разность потенциалов, продольные токи 2-й зоны и высыпания энергичных частиц во время модельных суббурь.

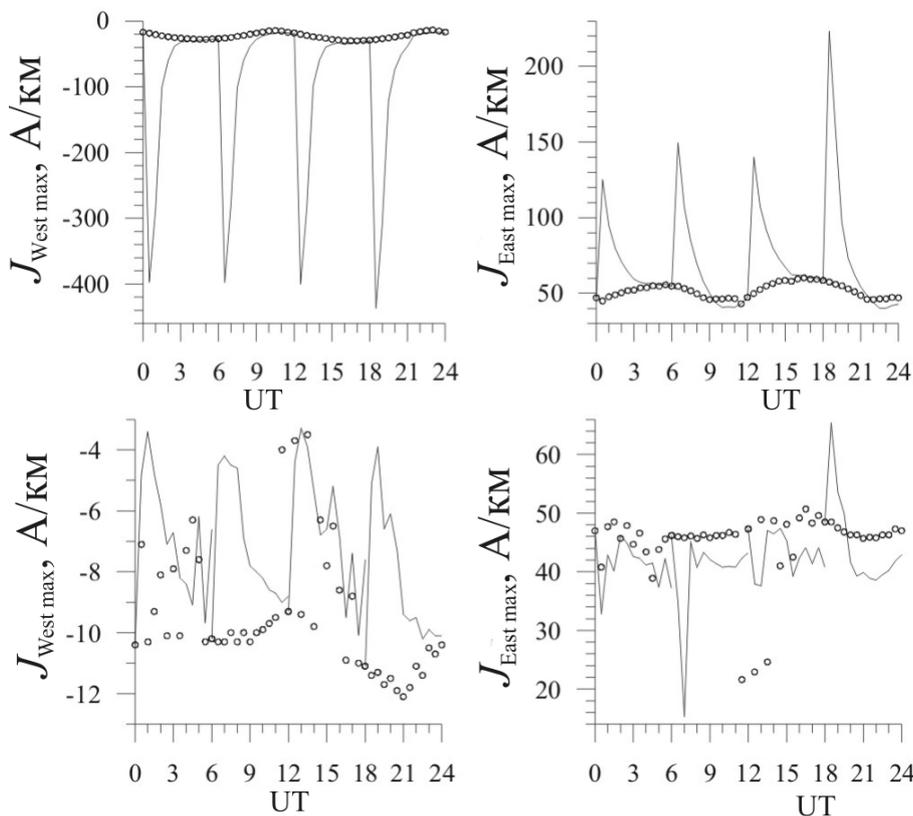


Рис. 6. Рассчитанная интенсивность аврорального электроджета (АЕJ) и экваториального электроджета (ЕЕJ) во время модельных суббурь с различными моментами начала (сплошные линии). Спокойный ход показан кружками.

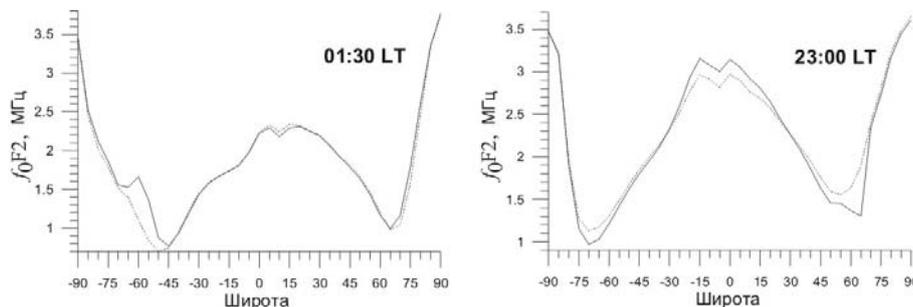


Рис. 7. Расслоение ГИП через 0.5 ч (слева) и через 6 ч (справа) после начала суббури (сплошные линии). Фоновые значения – пунктирные линии.

#### 4. Ионосферные эффекты последовательности бурь

Данное исследование посвящено численному моделированию ионосферных эффектов бурь 9–14 сентября 2005 г. В расчетах учитывалась зависимость от  $K_p$ -индекса разности потенциалов [11], высыпаний энергичных частиц [12] и продольных токов второй

зоны [13]. Из рис. 8 видно, что учет только магнитосферной конвекции приводит, в основном, к отрицательным возмущениям. Сравнение результатов модельных расчетов с экспериментальными данными ст. Иркутск и Якутск (рис. 8) и установок некогерентного рассеяния (УНР) в Millstone Hill и Arecibo (рис. 9, 10) выявило удовлетворительное качественное согласие.

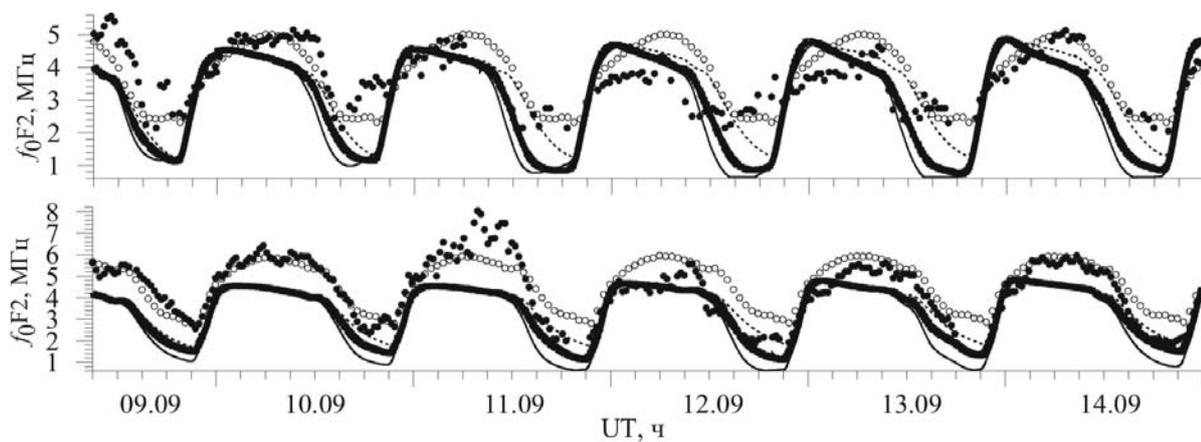


Рис. 8. Поведение  $f_0F_2$  над ст. Якутск (вверху) и Иркутск (внизу). Эффекты магнитосферной конвекции, рассчитанные без учета (тонкие линии) и с учетом (жирные линии) высыпаний и продольных токов, и спокойные условия (пунктир). Данные зондирования в возмущенный период ( $\bullet$ ) и в спокойных условиях ( $\circ$ ).

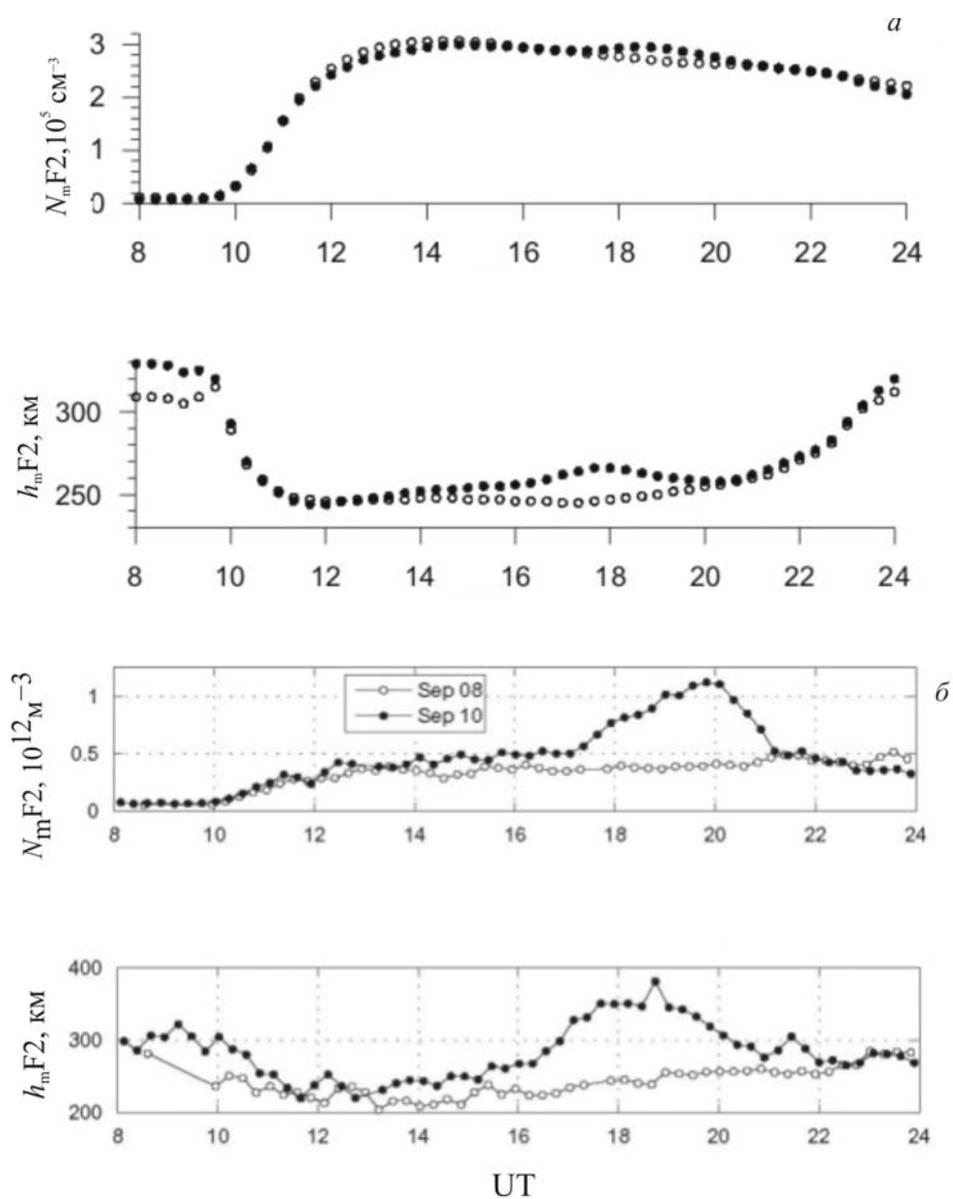


Рис. 9.  $N_mF_2$  и  $h_mF_2$  над ст. Millstone Hill для 10.09.2005; а – результаты расчетов, б – данные УНР из [14]. Фоновые значения ( $\circ$ ), буря ( $\bullet$ ).

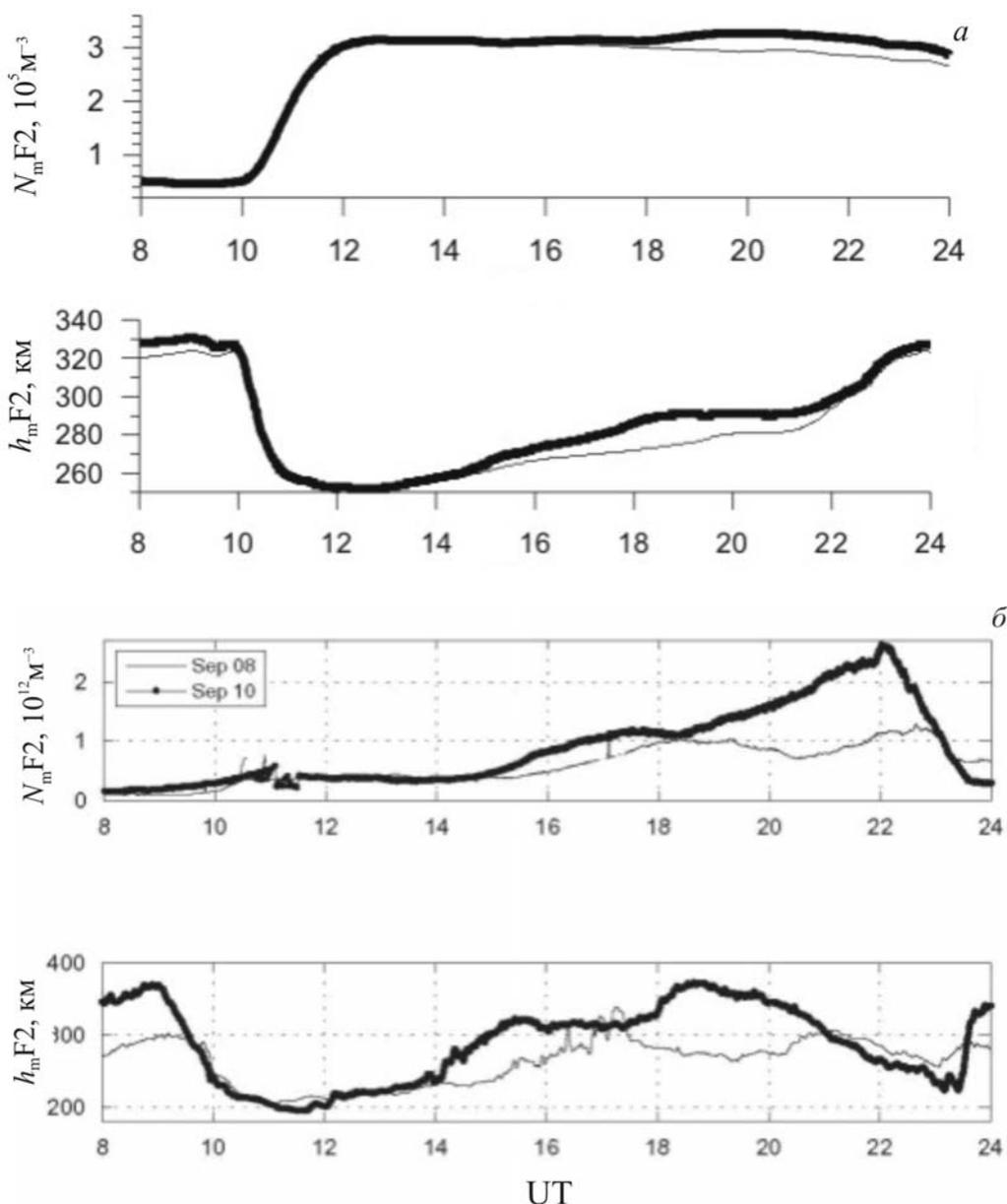


Рис. 10. То же, что на рис. 9 над ст. Агесибо. Фоновые значения – тонкие линии, буря – жирные линии.

Причина количественных различий результатов расчетов и наблюдений заключается в использовании зависимости входных параметров от 3-часового  $K_p$ -индекса (а не от  $A_E$ -индекса и дипольного приближения геомагнитного поля).

**Заключение**

Показано, что модифицированная модель ГСМ ТИП позволяет корректно описывать ЭА, формирование F3-слоя и ЕЕJ в низких широтах, а также ГИП и АЕJ в высоких широтах, как в спокойных условиях, так и во время возмущений.

Данное исследование выполнено при поддержке РФФИ (Грант № 08-05-00274).

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Namgaladze A.A., Korenkov Yu.N., Klimenko V.V., et al. Global model of the thermosphere-ionosphere-protonosphere system // Pure and Applied Geophysics (PAGEOPH). 1988. V. 127. P. 219–254.

2. Клименко В.В., Кореньков Ю.Н., Намгаладзе А.А. Влияние плазменных движений на распределение ионной и электронной температур в протоносфере и ионосфере Земли // Геомагнетизм и аэронавигация. 1992. Т. 32. С. 76–81.  
 3. Hedin A.E. Extension of the MSIS Thermosphere Model into the Middle and Lower Atmosphere // J. Geophys. Res. 1991. V. 96. P. 1159–1172.  
 4. Sen H.Y. Stratification of the F2 layer of the ionosphere over Singapore // J. Geophys. Res. 1949. V. 54. P. 363–366.  
 5. Huang C. A certain behavior of the ionospheric F2 region at low latitudes // Radio Sci. 1974. V. 9. P. 519–532.  
 6. Суроткин В.А., Намгаладзе А.А., Коломийцев О.П. Моделирование суточного развития расслоений F2-области экваториальной ионосферы // Геомагнетизм и аэронавигация. 1985. Т. 25. С. 394–399.  
 7. Balan N., Bailey G.J., Abdu M.A., et al. Equatorial plasma fountain and its effects over three locations: Evidence for an additional layer, the F3 layer // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. P. 2047–2056.  
 8. Balan N., Batista I.S., Abdu M.A., et al. Physical mechanism and statistics of occurrence of an additional layer in the equatorial ionosphere // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. P. 29169–29181.

9. Kamide Y. VII-1. The Auroral Electrojets: Relative Importance of Ionospheric Conductivities and Electric Fields. In: Auroral Physics. / Ed. by Meng C.-I., Rycroft M.J., Frank L.A. Cambridge UP. 1991. P. 385–399.
10. Shapovalova Yu.A., Namgaladze A.A., Namgaladze A.N., Khudukon B.Z. Stratification of the main ionospheric trough as an affect of noncoincidence of the Earth's geomagnetic and geographic axes. Physics of Auroral Phenomena, Proc. XXVI Annual Seminar, Apatity. 2003. P. 87–90.
11. Feshchenko E.Yu., Maltsev Yu.P. Relations of the polar cap voltage to the geophysical activity. Physics of Auroral Phenomena, Proc. XXVI Annual Seminar, Apatity. 2003. P. 59–61.
12. Zhang Y., Paxton L.J. An empirical  $K_p$ -dependent global auroral model based on TIMED/GUVI FUV data // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2008. V. 70. P. 1231–1242.
13. Kikuchi T., Hasimoto K.K., Nozaki K. Penetration of magnetospheric electric fields to the equator during a geomagnetic storm // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. doi:10.1029/2007JA012628.
14. Goncharenko L.P., Foster J.C., Coster A.J., Huang C., Aponte N., Paxton L.J. Observations of a positive storm phase on September 10, 2005 // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2007. V. 69. P. 1253–1272.

*Западное отделение ИЗМИРАН, Калининград*