

УДК 550.388.2

М.Г. Ботова, Ю.В. Романовская, А.А. Намгаладзе

Вариации ионосферы: сопоставление результатов моделирования с данными наблюдений

M.G. Botova, Yu.V. Romanovskaya, A.A. Namgaladze

Ionosphere variations: Comparison of model calculations and observation data

Аннотация. Проведено численное моделирование вариаций электронной концентрации и полного электронного содержания ионосферы в разные сезоны при низком и высоком уровнях солнечной активности с использованием глобальной численной модели верхней атмосферы Земли UAM. Результаты моделирования сопоставлены со значениями, рассчитанными по эмпирической модели ионосферы IRI, и данными наблюдений: наибольшее согласие демонстрируют указанные вариации для геомагнитных широт ($\pm 45^\circ$) в дневные часы при низкой солнечной активности (сезон значения не имеет); наибольшее расхождение значений зафиксировано для высоких широт, что обусловлено недостаточным количеством ионосферных наблюдений в областях полярных шапок.

Abstract. Electron density and ionospheric total electron content variations during different seasons and under low and high solar activity levels have been modeled using the global numerical Upper Atmosphere Model (UAM). The model results have been compared with the empirical IRI model values and observations data. The best agreement with empirical and observations values belongs to the UAM results for day-time hours, magnetic latitudes of $\pm 45^\circ$ and low solar activity irrespective of a season. The most divergence with empirical and observations values is demonstrated by the UAM results for high latitudes because of a deficiency of ionospheric observations in the polar caps.

Ключевые слова: ионосфера, численное моделирование, электронная концентрация, полное электронное содержание
Key words: ionosphere, numerical modeling, electron density, total electron content

1. Введение

Ионосферное моделирование развивается в течение 50 лет, начиная с одномерных моделей среднеширотной ионосферы для одного сорта ионов (O^+), по пути увеличения количества моделируемых параметров, распространения моделей на низкие и высокие широты, учета трехмерного характера переноса плазмы, описания как можно большего числа процессов в верхней атмосфере и связей между ее подсистемами.

Глобальные трехмерные физические модели являются наиболее точным инструментом для исследования верхней атмосферы Земли. Численные эксперименты, проводимые с помощью таких моделей, позволяют выявить основные физические механизмы, определяющие характер наблюдавшихся вариаций параметров среды. Принципы построения физических моделей, входные параметры и методы задания пространственных сеток описаны в работах (*Dickinson et al.*, 1981; *Namgaladze et al.*, 1988; *Schunk*, 1988; *Fuller-Rowell et al.*, 1991; *Decker et al.*, 1994; *Namgaladze et al.*, 1998c; *Peymirat et al.*, 1998; *Huba et al.*, 2008).

Трехмерная самосогласованная численная модель верхней атмосферы Земли UAM (Upper Atmosphere Model) (*Namgaladze et al.*, 1988; 1991; 1998a, b) описывает термосферу, ионосферу, плазмосферу и внутреннюю магнитосферу Земли в диапазоне высот от 80 км до $15R_E$ (R_E – радиус Земли). UAM рассчитывает концентрации основных нейтральных и заряженных компонент верхней атмосферы, температуры нейтрального, ионного и электронного газов, скорости движения заряженных и нейтральных частиц посредством численного интегрирования квазигидродинамических уравнений (непрерывности, движения и теплового баланса), а также при моделировании решается уравнение для потенциала электрического поля магнитосферного и термосферного (динамо) происхождения. Помимо полностью самосогласованной версии, в UAM реализована возможность использования эмпирической модели нейтрального состава и температуры NRLMSISE-00 (National Research Laboratory Mass Spectrometer, Incoherent Scatter Radar Extended Model) (*Picone et al.*, 2002) для расчета состава и температуры нейтрального газа.

Проверка адекватности описания среды с помощью теоретической модели осуществляется посредством сопоставления модельных результатов с данными наблюдений за поведением верхней атмосферы, и в частности ионосферы, при различных геофизических условиях. Такое тестирование позволяет скорректировать как входные параметры модели, так и коэффициенты реакций, уравнений и т.п. В значительной части работ, посвященных сравнению результатов моделирования и наблюдений, используются данные геофизических станций, полученные при изучении конкретных геомагнитных событий (Namgaladze et al., 2006; Burns et al., 2008; Klimenko et al., 2011; Codrescu et al., 2012; Solomon et al., 2013).

В настоящее время появилась возможность сравнивать теоретически рассчитанные глобальные распределения полного электронного содержания (total electron content, TEC) ионосферы с данными, полученными спутниками системы глобального позиционирования GPS (Global Positioning System) (Pedatella et al., 2011; Codrescu et al., 2012). Кроме того, тестирование физических моделей можно проводить с использованием эмпирических моделей, в частности различных версий модели IRI (International Reference Ionosphere) (Bilitza et al., 2008; 2011). Однако и сама эмпирическая модель IRI является предметом тестирования и проверки (Potula et al., 2011; Okoh et al., 2012; Yu et al., 2013) вследствие усреднения данных наблюдений, применяемых при ее построении.

Следует отметить детальное описание результатов тестирования различных моделей системы "ионосфера – термосфера" в работах (Shim et al., 2011; 2012), где исследовалась адекватность воспроизведения моделями поведения скоростей вертикального дрейфа плазмы, плотностей электронного и нейтрального газов, электронной концентрации и высоты максимума F2-области (NmF2 и HmF2 соответственно) во время девяти отобранных событий: двух сильных и четырех умеренных геомагнитных бурь, а также трех геомагнитно спокойных периодов. В качестве результатов наблюдений привлекались данные радаров некогерентного рассеяния и спутников CHAMP (Challenging Minisatellite Payload) и COSMIC (Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate).

Результаты теоретических расчетов ионосферных параметров, выполненных с помощью модели UAM, сопоставлялись с одновременно полученными данными при применении: 1) семи радаров некогерентного рассеяния и эмпирической модели IRI-2001 (Namgaladze et al., 2006); 2) спутника CHAMP для измерения скорости термосферного ветра (Forster et al., 2011). Тестирование модели UAM проводилось также с использованием данных ионосферной томографии (Namgaladze et al., 2000; 2003; Korableva et al., 2008). В работе (Knyazeva et al., 2012) области повышенной электронной концентрации исследовались не только методом численного моделирования, но и с привлечением результатов эмпирических расчетов по модели IRI-2001.

В данной работе проведено численное моделирование поведения ионосферы для двух уровней солнечной активности и различных сезонов. Результаты расчетов сопоставлены с данными эмпирических моделей ионосферы (IRI-2007 и IRI-2012) и данных измерений полного электронного содержания с использованием спутников системы GPS (GPS TEC). Определены приоритетные направления дальнейшего совершенствования модели UAM.

2. Методика модельных расчетов

Численные эксперименты проводились с помощью модели UAM двух версий: 1) включающей эмпирическую термосферную модель NRLMSIS-00 для расчета состава и температуры нейтральной атмосферы (далее UAM-ТМ); 2) полностью самосогласованной, содержащей расчет термосферных параметров посредством решения уравнений непрерывности, теплового баланса и движения для нейтральной атмосферы (далее UAM-ТТ).

Моделирование поведения параметров верхней атмосферы осуществлялось для условий равноденствия и солнцестояния при двух уровнях солнечной активности. Так, декабрьскому солнцестоянию 2004 г. и апрельскому равноденствию 2005 г. соответствует величина потока солнечного радиоизлучения на волне 10,7 см $F_{10,7} \sim 90$, в то время как декабрьскому солнцестоянию 2000 г. и апрельскому равноденствию 2002 г. – $F_{10,7} \sim 180$.

Входные параметры задавались идентично для обеих версий модели: 1) спектры потоков солнечного ультрафиолетового и крайнего ультрафиолетового излучений были получены по модели (Nusinov, 1984); 2) разность электрического потенциала поперек полярной шапки была рассчитана по эмпирической зависимости от аврорального индекса AE (Weimer et al., 1990); 3) потоки высыпавшихся частиц были взяты в соответствии с эмпирической моделью (Hardy et al., 1985).

При вычислениях по версиям UAM пространственная сетка имела следующие характеристики: переменный шаг по широте (от 2° вблизи экватора до 2.5° вблизи полюсов при расчете ионосферных параметров, от 4° вблизи экватора до 2° вблизи полюсов при расчете параметров термосферы),

постоянный шаг по долготe (15°) и переменный шаг по высоте (от 3 км на нижней границе вблизи 80 км до 20 км в F2-слое – области главного ионосферного максимума).

В качестве начальных условий использовались квазистационарные решения уравнений, полученные в ходе двукратного прогона (расчета параметров верхней атмосферы для одних и тех же суток). Сопоставление результатов эмпирической модели IRI-2007 и данных GPS TEC проводилось со значениями, рассчитанными по модели UAM для 24:00 UT пятых модельных суток.

3. Результаты модельных расчетов

3.1. Геомагнитные карты NmF2 и TEC

Результаты моделирования представлены в виде геомагнитных карт, отражающих вариации ионосферных параметров (широтно-долготных вариации) – концентраций электронов в максимуме F2-слоя (NmF2) и полного электронного содержания (TEC) для 03:00 и 15:00 MLT.

Глобальные распределения NmF2 и TEC при низком ($F_{10,7} \sim 90$) и высоком ($F_{10,7} \sim 180$) уровнях солнечной активности для декабрьского солнцестояния (26.12.2000 и 26.12.2004) и апрельского равноденствия (26.04.2002 и 26.04.2005) отражены на рис. 1, 2. Результаты расчетов по модели UAM (UAM-TM – первый ряд на рис. 1, 2; UAM-TT – второй ряд на рис. 1, 2) сопоставлены со значениями, полученными с использованием эмпирической модели IRI-2007 (третий ряд на рис. 1, 2) и данными GPS TEC (четвертый ряд на рис. 2).

На картах отмечены положения подсолнечной точки (черным кружком) и географического экватора (черной сплошной линией).

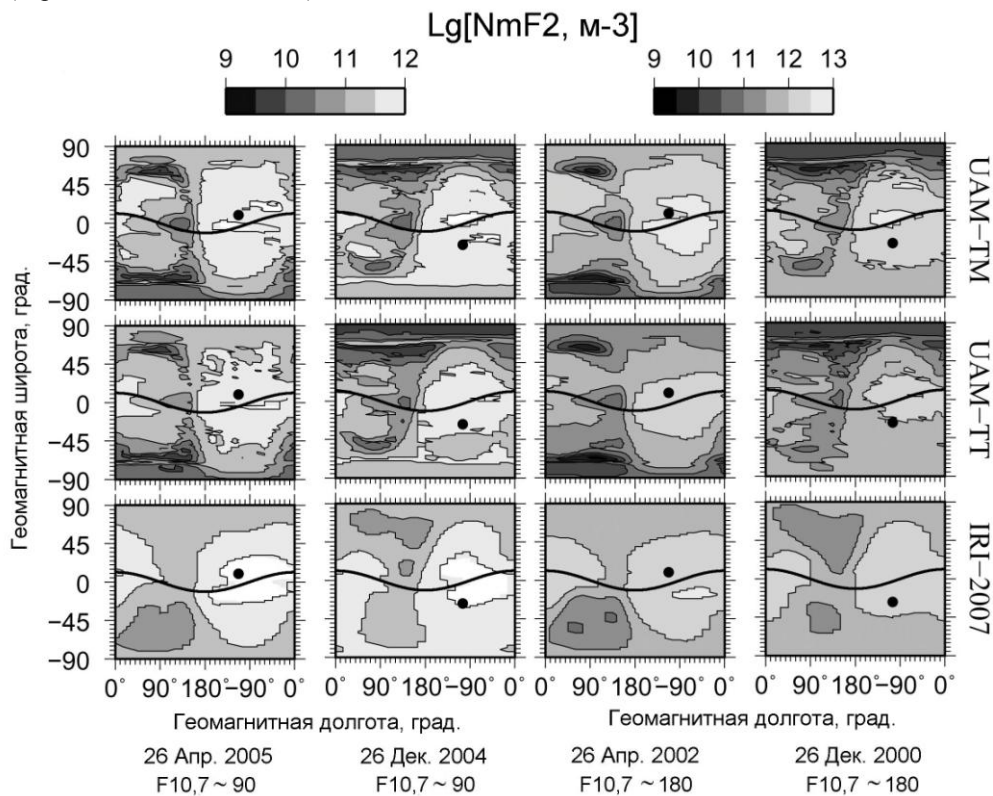


Рис. 1. Геомагнитные карты электронной концентрации в максимуме F2-слоя для двух уровней солнечной активности и двух сезонов

Распределения параметров по модели IRI-2007 и данных GPS TEC являются более сглаженными по сравнению с результатами численных расчетов, что представляется логичным, учитывая осреднения данных наблюдений, используемые при построении эмпирических моделей. Отметим, что версия UAM-TT в целом дает меньшие значения ионосферных параметров, чем UAM-TM. При этом положения и магнитуды максимумов NmF2, полного электронного содержания, а также положение главного ионосферного провала, полученные в ходе численного моделирования, согласуются как с результатами эмпирической модели, так и с данными наблюдений. Наибольшие различия распределений ионосферных параметров, рассчитанных по модели UAM, с эмпирическими значениями и данными наблюдений

принадлежат результатам, полученным для высоких широт. Указанные выше различия между значениями ионосферных параметров, наблюдавшихся спутниками сети GPS, рассчитанных численно и по эмпирической модели, предположительно, связаны с недостаточностью ионосферных наблюдений в полярных шапках, где существуют минимумы концентрации электронов, обусловленные действием полярного ветра (Brunelli, Namgaladze, 1988).

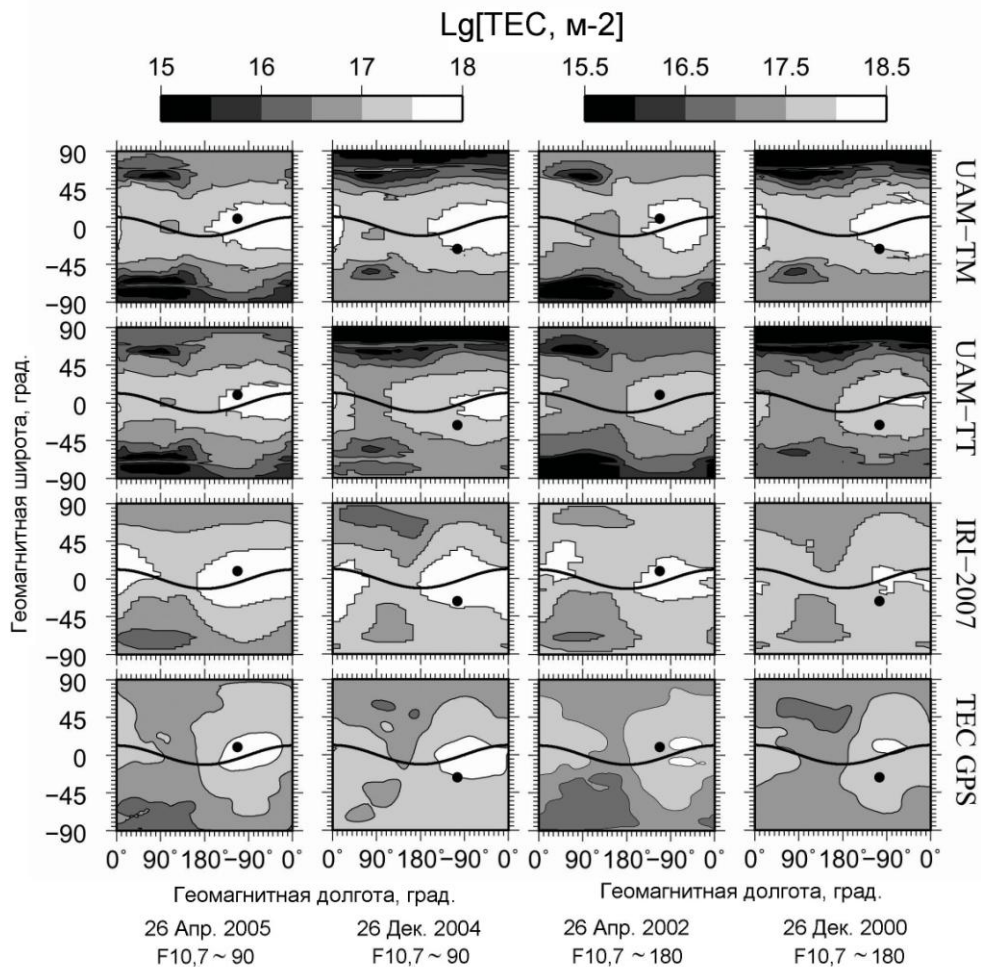


Рис. 2. Геомагнитные карты полного электронного содержания для двух уровней солнечной активности и двух сезонов

3.2. Широтные вариации NmF2 и TEC

Широтные вариации NmF2 и TEC, рассчитанные с использованием версий численной модели (UAM-TM и UAM-TT) и эмпирической модели IRI-2007 для магнитного меридиана 15-03 MLT, а также данные GPS TEC для той же геомагнитной долготы показаны на рис. 3, 4. Широтные вариации представлены для условий апрельского равноденствия (26.04.2005, нижний ряд), декабрьского солнцестояния (26.12.2004, верхний ряд) при низкой солнечной активности (рис. 3) и для условий апрельского равноденствия (26.04.2002, нижний ряд) и декабрьского солнцестояния (26.12.2000, верхний ряд) при высокой солнечной активности (рис. 4). На рис. 3, 4 отмечены кружками: белыми – результаты расчетов по UAM-TM, черными – по UAM-TT; штриховой линией – по IRI-2007, сплошной линией – данные GPS TEC.

Версии численной модели UAM дают для условий низкой и высокой солнечной активности схожие по форме вариации ионосферных параметров. При условии высокой солнечной активности различие между версиями UAM значительнее и составляет максимально фактор 3. При этом максимальное расхождение результатов эмпирической модели IRI-2007 и данных наблюдений полного электронного содержания также составляет примерно фактор 3.

Наибольшее сходство результатов численных расчетов, значений эмпирической модели ионосферы и данных наблюдений демонстрируют вариации электронной концентрации и полного электронного содержания в средних и низких широтах ($\pm 45^\circ$) в дневные часы при низкой солнечной

3.3. Высотные профили электронной плотности

Результаты численных расчетов высотных профилей электронной концентрации в разные сезоны на геомагнитных широтах $\pm 45^\circ$ и геомагнитных долготах 115° и 295° (03:00 и 15:00 MLT) при низком и высоком уровнях солнечной активности соответственно, а также значения, полученные с помощью двух версий эмпирической модели IRI (IRI-2007 и IRI-2012), представлены на рис. 5, 6.

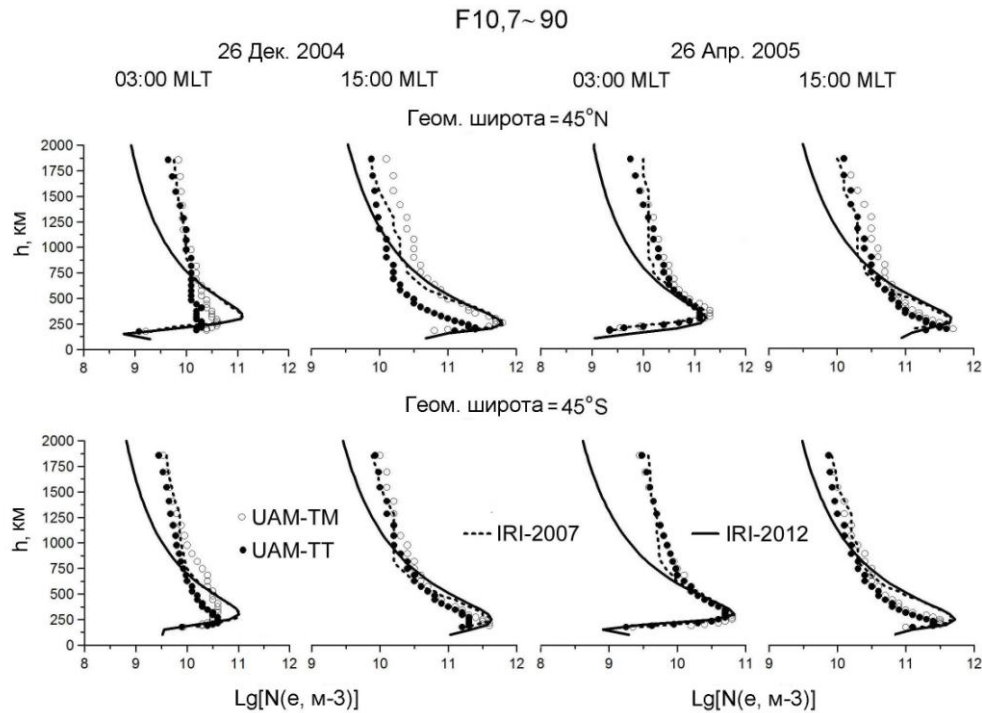


Рис. 5. Высотные профили электронной концентрации для низкой солнечной активности

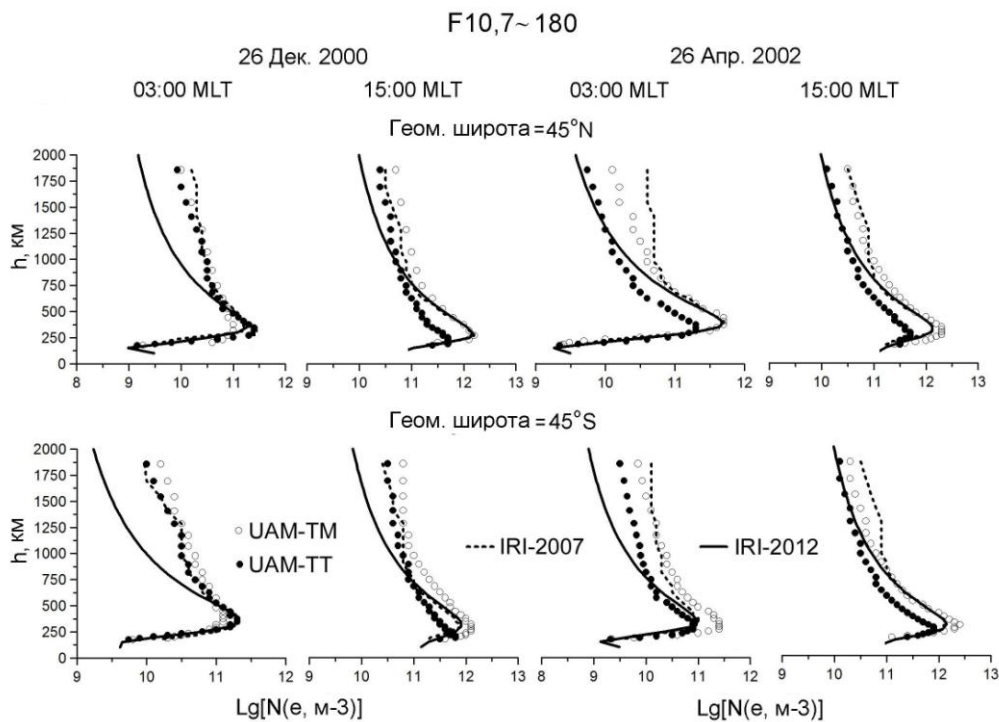


Рис. 6. Высотные профили электронной концентрации для высокой солнечной активности

Высотные профили электронной концентрации, рассчитанные по двум версиям модели UAM, имеют похожую форму. При низкой солнечной активности максимум электронной концентрации находится на высотах: ~ 250 км – в дневное время; ~ 300 км – в ночное время. При высокой солнечной активности главный ионосферный максимум расположен в дневное время на высоте ~ 300 км и в ночное время – ~ 350 км.

В целом версия UAM-TM дает бóльшие значения концентрации электронов, чем UAM-TT (максимально в четыре раза, а в среднем – в два раза).

Значения концентрации электронов, полученные с помощью моделей IRI-2007 и IRI-2012 для высот менее 600 км, практически одинаковы. Нижние части высотных профилей показывают, что в большинстве случаев как минимум одна версия модели UAM демонстрирует сходство со значениями IRI. На высотах менее 600 км соответствие результатов UAM данным IRI имеет место для ночных часов и условий: 1) равноденствия при низкой солнечной активности; 2) солнцестояния при высокой солнечной активности.

В верхней части высотных профилей наблюдается расхождение между значениями разных версий IRI, которое возрастает с увеличением высоты. IRI-2007 дает в десять раз большую концентрацию электронов, чем IRI-2012. Для высот более 600 км обе версии модели UAM демонстрируют согласованность с IRI-2007. Профили электронной концентрации, рассчитанные по версиям UAM-TM и UAM-TT, находятся между высотными профилями эмпирических моделей IRI-2012 и IRI-2007. На рис. 5, 6 отмечены кружками: белыми – результаты расчетов по UAM-TM, черными – по UAM-TT; штриховой линией – по IRI-2007, сплошной линией – по IRI-2012.

4. Заключение

Сравнительный анализ результатов численного моделирования широтно-долготных, широтных и высотных вариаций ионосферных параметров, полученных с помощью двух версий численной модели верхней атмосферы Земли UAM для двух уровней солнечной активности и разных сезонов, значений, рассчитанных по эмпирической модели ионосферы IRI, а также данных наблюдений полного электронного содержания ионосферы позволил сделать следующие выводы.

Наибольшее согласие результаты численных расчетов имеют со значениями эмпирической модели IRI-2007 и данными наблюдений, полученными для электронной концентрации и полного электронного содержания в средних и низких широтах ($\pm 45^\circ$) в дневные часы при низкой солнечной активности (независимо от сезона). Наибольшее отличие результатов численного моделирования от эмпирических значений и данных наблюдений отмечено для высоких широт, для которых обе версии модели UAM дают меньшие значения ионосферных параметров, воспроизводя как главный ионосферный провал, так и "провал легких ионов", обусловленный действием полярного ветра. Несогласованность модельных результатов с эмпирическими значениями и данными измерений связана с недостаточным количеством ионосферных наблюдений в области полярной шапки.

Численно рассчитанные значения электронной концентрации, полученные для высот менее 600 км, демонстрируют сходство со значениями обеих версий эмпирической модели ионосферы (IRI-2007 и IRI-2012). Для больших высот профили электронной концентрации, рассчитанные по версиям модели UAM, находятся между высотными профилями эмпирических моделей IRI-2012 и IRI-2007, но ближе к IRI-2007.

Литература

- Bilitza D., McKinnell L.-A., Reinisch B., Fuller-Rowell T.** The International Reference Ionosphere (IRI) today and in the future. *Journal of Geodesy*, v. 85, p. 909-920, 2011.
- Bilitza D., Reinisch B.W.** International reference ionosphere 2007: Improvements and new parameters. *Advances in Space Research*, N 42, p. 599-609, 2008.
- Brunelli B.E., Namgaladze A.A.** Physics of ionosphere. *M., Nauka*, 528 p., 1988 (in Russian).
- Burns A.G., Wang W., Wiltberger M. et al.** An event study to provide validation of TING and CMIT geomagnetic middle-latitude electron densities at the F2 peak. *Journal of Geophysical Research*, N 113, p. A05310, 2008.
- Codrescu M.V., Fedrizzi C., Fuller-Rowell T.J. et al.** A real-time run of the Coupled Thermosphere Ionosphere Plasmasphere Electrodynamics (CTIPE) model. *Space Weather*, N 10, p. S02001, 2012.
- Decker D.T., Valladares C.E., Sheehan R. et al.** Modeling daytime F-layer patches over Sondrestrom. *Radio Science*, N 29, p. 249-268, 1994.
- Dickinson R.E., Ridley E.C., Roble R.G.** A three-dimensional general circulation model of the thermosphere. *Journal of Geophysical Research*, N 86(A3), p. 1499-1512, 1981.

- Forster M., Namgaladze A.A., Doronina E.N., Prokhorov B.E.** High-latitude thermospheric winds: Satellite data and model calculations. *Russian Journal of Physical Chemistry B, Focus on Physics*, N 5(3), p. 439-446, 2011.
- Fuller-Rowell T.J., Rees D., Parish H.F. et al.** Lower thermosphere coupling study: comparison of observations with predictions of the University College London-Sheffield Thermosphere-Ionosphere Model. *Journal of Geophysical Research*, N 96, p. 1181-1202, 1991.
- Hardy D.A., Gussenhoven M.S., Holeman E.A.** A statistical model of auroral electron precipitation. *Journal of Geophysical Research*, N 90, p. 4229-4248, 1985.
- Huba J.D., Joyce J.D., Krall G.** Three-dimensional equatorial spread F modeling. *Journal of Geophysical Research*, N 35, p. L10102, 2008.
- 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 Science*, N 46(3), p. RS0D03, 2011.
- Knyazeva M.A., Namgaladze A.A., Martynenko O.V.** Mathematical modeling of nighttime enhanced electron density regions in the Earth's ionospheric F2 layer and plasmasphere. *Geomagnetism and Aeronomy*, N 52(3), p. 368-377, 2012.
- Korableva I.V., Namgaladze A.A., Namgaladze A.N.** High-latitude ionosphere during magnetic storms of October 26, 2003–November 1, 2003: Tomographic reconstructions and numerical modeling. *Geomagnetism and Aeronomy*, N 48(5), p. 642-651, 2008.
- Namgaladze A.A., Korenkov Yu.N., Klimenko V.V. et al.** Global model of the thermosphere-ionosphere-protonosphere system. *Pure and Applied Geophysics*, № 127(2/3), p. 219-254, 1988.
- Namgaladze A.A., Korenkov Yu.N., Klimenko V.V. et al.** Numerical modelling of the thermosphere-ionosphere-protonosphere system. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, N 53(11/12), p. 1113-1124, 1991.
- Namgaladze A.A., Martynenko O.V., Namgaladze A.N.** Global model of the upper atmosphere with variable latitudinal integration step. *Geomagnetism and Aeronomy International*, N 1(1), p. 53-58, 1998a.
- Namgaladze A.A., Martynenko O.V., Volkov M.A. et al.** High-latitude version of the global numerical model of the Earth's upper atmosphere. *Proceedings of the MSTU*, № 1(2), p. 23-84, 1998b.
- Namgaladze A.A., Namgaladze A.N., Volkov M.A.** Seasonal effects in the ionosphere-thermosphere response to the precipitation and field-aligned current variations in the cusp region. *Annals of Geophysics*, N 16(10), p. 1283-1298, 1998c.
- Namgaladze A.A., Namgaladze A.N., Yurik R.Yu.** Global modeling of the quiet and disturbed upper atmosphere. *Physics and Chemistry of the Earth*, N 5-6(25), p. 533-536, 2000.
- Namgaladze A.A., Zubova Yu.V., Namgaladze A.N. et al.** Modelling of the ionosphere/thermosphere behavior during the April 2002 magnetic storms: A comparison of the UAM results with the ISR and NRLMSISE-00 data. *Advances in Space Research*, N 37(2), p. 380-391, 2006.
- Namgaladze A.N., Evstafiev O.V., Khudukon B.Z., Namgaladze A.A.** Model interpretation of the ionospheric F-region electron density structures observed by ground-based satellite tomography at sub-auroral and auroral latitudes in Russia in January-May 1999. *Annales Geophysicae*, N 4(21), p. 1005-1016, 2003.
- Nusinov A.A.** Dependence of the short-wave solar radiation intensity on the activity level. *Journal of Geomagnetism and Aeronomy*, N 24(4), p. 529-536, 1984 (in Russian).
- Okoh D., Eze A., Adedoja O. et al.** A comparison of IRI-TEC predictions with GPS-TEC measurements over Nsukka, Nigeria. *Space Weather*, N 10, p. S10002, 2012.
- Pedatella N.M., Forbes J.M., Maute A. et al.** Longitudinal variations in the F-region ionosphere and the topside ionosphere-plasmasphere: Observations and model simulations. *Journal of Geophysical Research*, N 116, p. A12309, 2011.
- Peymirat C., Richmond A.D., Emery B.A., Roble R.G.** A magnetosphere-thermosphere-ionosphere electrodynamics general-circulation model. *Journal of Geophysical Research*, N 103(8), p. 17467-17477, 1998.
- Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., Aikin A.C.** NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues. *Journal of Geophysical Research*, N 107, p. SIA15-1–SIA15-16, 2002.
- Potula B.S., Chu Y.-H., Uma G. et al.** A global comparative study on the ionospheric measurements between COSMIC radio occultation technique and IRI model. *Journal of Geophysical Research*, N 116, p. A02310, 2011.
- Schunk R.W.** A mathematical model of the middle and high latitude ionosphere. *Pure and Applied Geophysics*, N 127(2/3), p. 255-303, 1988.
- Shim J.S., Kuznetsova M., Rastätter L. et al.** CEDAR Electrodynamics Thermosphere Ionosphere (ETI) Challenge for systematic assessment of ionosphere/thermosphere models: NmF2, hmF2, and vertical drift using ground-based observations. *Space Weather*, N 9, p. S12003, 2011.

- Shim J.S., Kuznetsova M., Rastätter L. et al.** CEDAR Electrodynamics Thermosphere Ionosphere (ETI) Challenge for systematic assessment of ionosphere/thermosphere models: Electron density, neutral density, NmF2, and hmF2 using space based observations. *Space Weather*, N 10, p. S10004, 2012.
- Solomon S.C., Qian L., Burns A.G.** The anomalous ionosphere between solar cycles 23 and 24. *Journal of Geophysical Research*, N 118(10), p. 6524-6535, 2013.
- Weimer D.R., Maynard N.C., Burke W.J., Liebrecht C.** Polar cap potentials and the auroral electrojet indices. *Planetary and Space Science*, N 38(9), p. 1207-1222, 1990.
- Yu Y., Wan W., Zhao B. et al.** Modeling the global NmF2 from the GNSS-derived TEC-GIMs. *Space Weather*, N 11(5), p. 272-283, 2013.

Информация об авторах

Ботова Мария Геннадьевна – Политехнический институт МГТУ, кафедра физики, науч. сотрудник, e-mail: botovamg@gmail.com

Botova M.G. – Polytechnic Institute of MSTU, Physics Department, Scientist, e-mail: botovamg@gmail.com

Романовская Юлия Владимировна – Политехнический институт МГТУ, кафедра физики, канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник, e-mail: y-romanovskaya@yandex.ru

Romanovskaya Yu.V. – Polytechnic Institute of MSTU, Physics Department, Cand. of Phys.-Math. Sci., Scientist, e-mail: y-romanovskaya@yandex.ru

Намгаладзе Александр Андреевич – Политехнический институт МГТУ, кафедра физики, д-р физ.-мат. наук, профессор, гл. науч. сотрудник, e-mail: namgaladze@yandex.ru

Namgaladze A.A. – Polytechnic Institute of MSTU, Physics Department, Dr of Phys.-Math. Sci., Professor, Head Scientist, e-mail: namgaladze@yandex.ru