

УДК 621.371+551.510.413.5

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ИОНОСФЕРЫ ЗЕМЛИ, ВЫЗВАННЫХ ТРЕНДОМ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ**

А.Н. Ляхов, Т.В. Лосева, А.В. Черменин, Б.Г. Гаврилов

Поступила 09.11.2016 г.

Представлены результаты численного моделирования изменений ионосферы Земли при наблюдаемых трендах геомагнитного поля за период 1980–2014 гг. Моделирование проведено с использованием трехмерной самосогласованной модели ионосферы и термосферы Земли TIEGCM. Физический механизм, определяющий влияние трендов геомагнитного поля на ионосферу, заключается в изменении фазового сдвига между магнитным и солнечным локальным временем.

Изменения ионосферы, вызванные изменением геомагнитного поля не являются катастрофическими, но должны приниматься во внимание при прогнозе распространения КВ радиоволн.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ИОНОСФЕРА, ГЕОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ, ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

### **ВВЕДЕНИЕ**

В последние десятилетия наблюдается ускоренное изменение магнитного поля Земли [1] (см. также <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/poles/polesexp.html>). Ранее, в работе [2] были представлены результаты численного моделирования по модели СТМ [3] ионосферных эффектов, которые могли бы наблюдаться при прогнозируемом на 2050 год изменении магнитного поля. Основная критика работы [2] заключалась в незначительном изменении координат геомагнитных полюсов, по сравнению с магнитными полюсами. Зависимость же структур высыпаний от положения геомагнитного полюса приводила критиков к выводу о незначимости возможных эффектов. С целью верификации выдвинутых в [2] положений в настоящей работе проведено численное моделирование влияния изменения магнитного поля Земли на состояние ионосферы на период 1980-2014 годы, для которого данные по магнитному полю могут считаться достоверными (в отличие от спекулятивного прогноза Canada Geomagnetic Service, использованного в [2]). Численное моделирование выполнено с использованием трехмерной самосогласованной модели ионосферы и термосферы NCAR TIEGCM 2.0 [4].

### **ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Модель TIEGCM осуществляет совместное решение уравнений динамики плазмы и нейтральной атмосферы под воздействием солнечного излучения, потоков высыпавшихся электронов и протонов, в электрических полях, определяемых самосогласованным образом. В TIEGCM используется модель магнитного поля Земли IGRF-2012 [5]. Численная модель позволяет вести моделирование как конкретных событий, через набор входных параметров плазмы солнечного ветра, так и климатологические расчеты, с использованием в качестве входных параметров индексов солнечной (F10.7) и геомагнитной (Kp) активности. Год, на который выполняются расчеты, также является входным параметром, задавая значения магнитного поля Земли на расчетной сетке. Для климатологического моделирования использовался режим расчетов на грубой сетке с разрешением 5° на 5° по долготе/широте. Диапазон высот, охватываемый расчетами, лежит в диапазоне 90-600 км, и зависит от состояния термосферы (в модели использована логарифмическая сетка по уровням давления).

Расчеты выполнялись для 80 дня года (21 марта) для следующих лет: 1980, 2004 и 2014 гг. Модель IGRF-2012 для указанных лет выполняет расчеты с достоверными (definite) коэффициентами разложения магнитного поля Земли. Уровень солнечной активности фиксировался на уровне F10.7=120, уровень геомагнитной активности был задан постоянным и равным Kp=4.

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Из всего набора выходных параметров модели TIEGCM ограничимся рассмотрением NmF2 и hmF2 и токовых систем в ионосфере. На рисунках 1а-г представлено относительное изменение NmF2 для четырех моментов времени по UT в северном полушарии в 2014 году по отношению к 1980 году. На рисунках 2а-г представлено относительное изменение hmF2 для тех же условий. Вариации высоты F2 слоя находятся в пределах  $\pm 5\%$ , изменение электронной концентрации в максимуме F2 слоя находится в пределах  $\pm 15\text{--}40\%$ .

Как показано, например, в [6] NmF2 и hmF2 являются «интегральными» ионосферными параметрами, отражающими совместное влияние на ионосферу большого количества разнонаправленных факторов. При рассмотрении полярных областей резонно предположить, что изменение этих параметров в расчетах вызвано изменением энерговыделения в термосфере, вызванного сдвигом токовых систем (а опосредованно паттернов высыпаний, электрического поля, изменения нейтрального термосферного ветра и т.д.).

На рисунке 3а-б представлено распределение вертикально-проинтегрированного трехмерно-го электрического тока в ионосфере (меридиональная компонента, положительное направление на север) для 1980 и 2014 года в геомагнитной системе координат. Пространственное распределение тождественно. Аналогичная картина наблюдается и для зональной компоненты тока.

В географических координатах ситуация изменяется (рисунок 4а-б). Относительное изменение составляет  $\pm 15\%$ . Становится заметным выделенное направление смещения энерговыделения в ионосфере. Конвертация геомагнитных координат в географическую на соответствующую эпоху выполнена в программе GEOCGM01.

Как было показано в [1], динамика изменения магнитного поля Земли в северном и южном полушариях отличается сильной асимметрией. На рисунке 5 представлено зональное среднее относительного изменения электронной концентрации в координатах широта-давление в 2014 году по отношению к 1980 году. На рисунке 6 в тех же координатах представлено зональное среднее относительного изменения температуры электронов.

Полученные результаты численного моделирования показывают, что в рамках гипотезы о слабом изменении процессов в магнитосфере Земли при *наблюдаемом* изменении магнитного поля (что позволяет использовать имеющиеся эмпирические модели высыпаний энергичных электронов и протонов) эффекты, вызванные изменением только магнитного поля являются заметными в северном полушарии. Интересным фактом является разнесение в пространстве эффектов для электронной концентрации и температуры. Последняя демонстрирует географически ясный, хотя и слабый (на уровне  $\pm 3\%$ ) эффект в приэкваториальной зоне. Изменение электронной концентрации в южном полушарии незначительны.

Необходимо подчеркнуть, что представленные результаты не являются оценкой истинных трендов электронной концентрации и температуры. Тренды параметров ионосферы определяются не только изменением геомагнитного поля, но и изменением параметров термосферы и возможными медленными вариациями солнечной активности [7,8]. Попытка смоделировать тренды ионосферных параметров в рамках самосогласованной модели ионосферы и магнитосферы CMIT представлена в [9]. Если в рамках нашего подхода паттерны высыпаний энергичных частиц следуют за изменением геомагнитного поля согласно эмпирическим моделям, входящим в состав TIE-GCM [4], в работе [9] предпринята попытка определить потоки частиц из магнитосферы с помощью численной модели. Однако расчеты взаимодействия солнечного ветра с внешней магнитосферой Земли требуют более корректного задания геомагнитного поля на больших расстояниях, чем это позволяет модель IGRF-2012. Приближение идеальной МГД для описания процессов взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой в [9] является, на наш взгляд, слишком сильным. Воспроизведение трендов в численном моделировании требует использования более громоздких и требовательных к вычислительным ресурсам моделей, например комплекса SWMF [10].

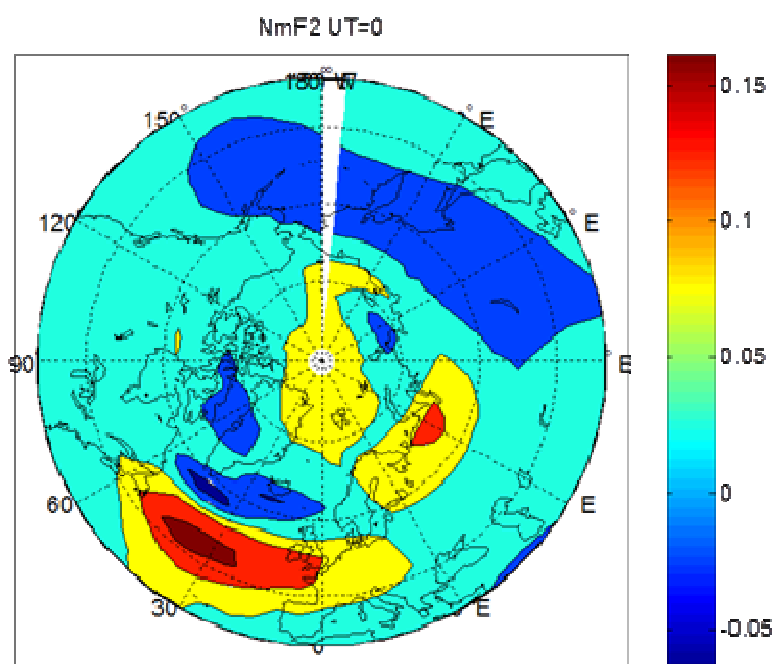


Рис. 1а. Относительное изменение NmF2 в 2014 году по отношению к 1980 году для UT=0.

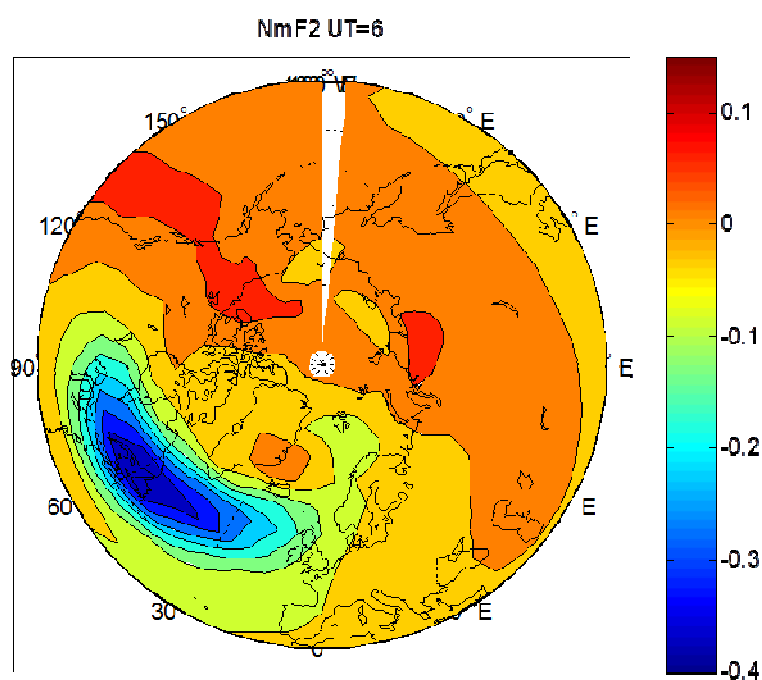


Рис. 1б. Относительное изменение NmF2 в 2014 году по отношению к 1980 году для UT=6.

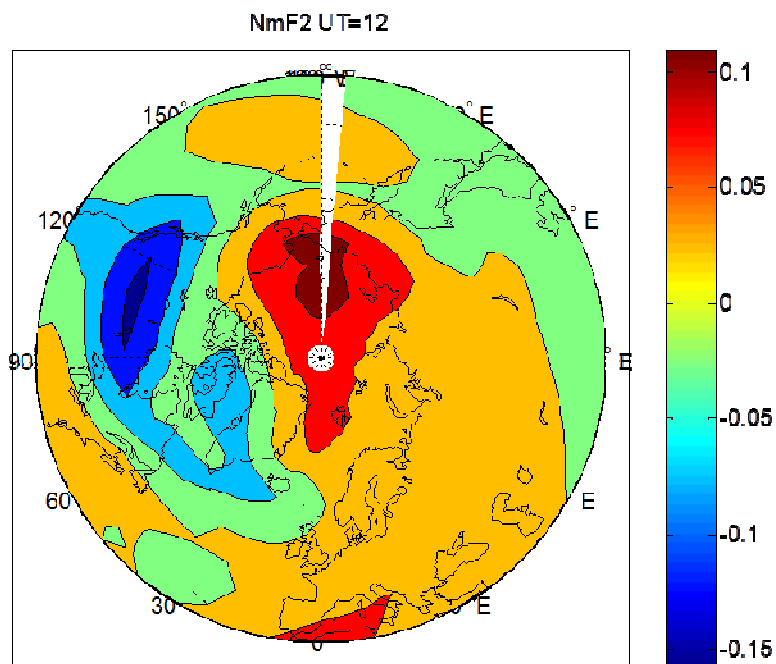


Рис. 1в. Относительное изменение NmF2 в 2014 году по отношению к 1980 году для UT=12.

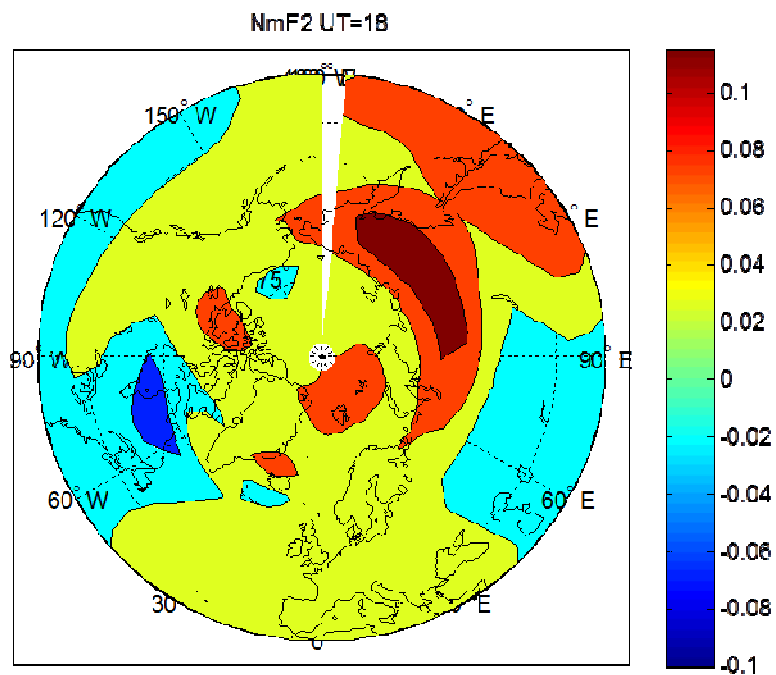


Рис. 1г. Относительное изменение NmF2 в 2014 году по отношению к 1980 году для UT=18.

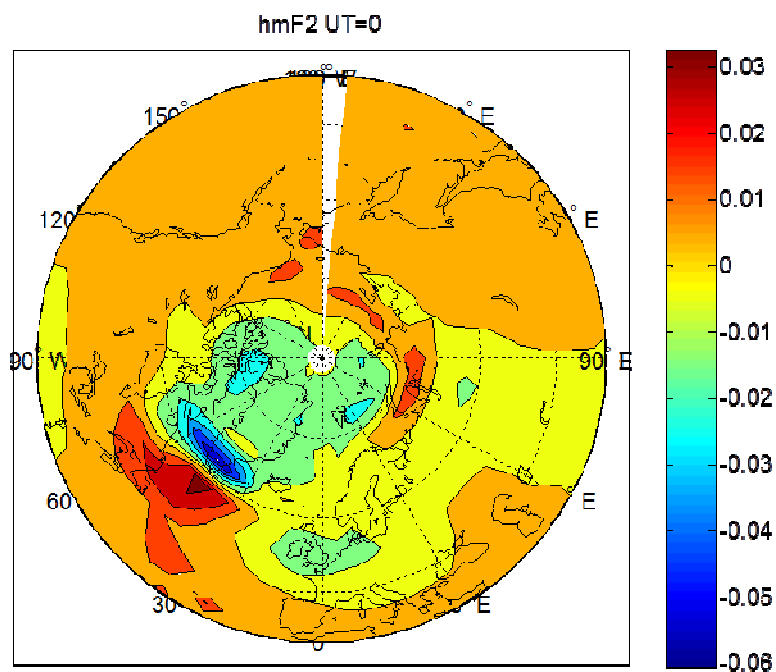


Рис. 2а. Относительное изменение hmF2 в 2014 году по отношению к 1980 году для UT=0.

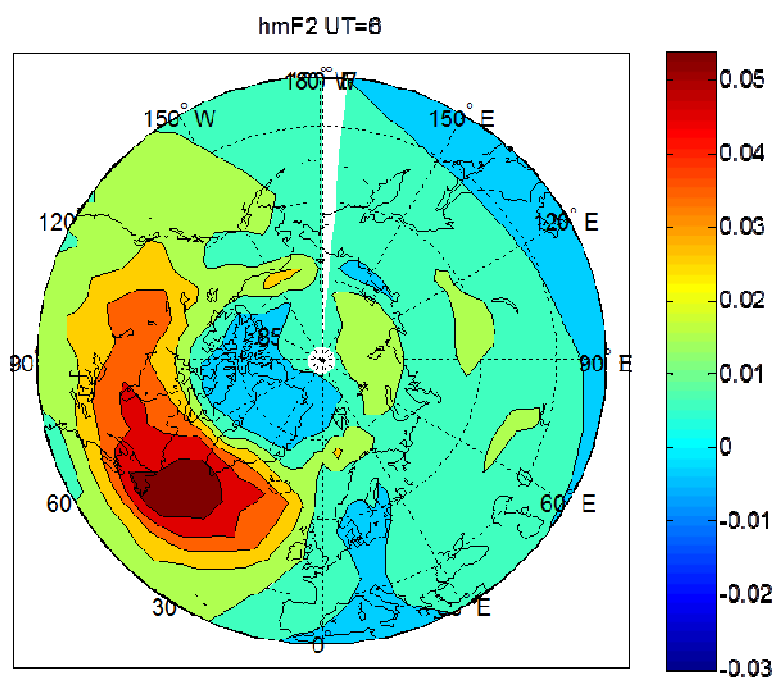


Рис. 2б. Относительное изменение hmF2 в 2014 году по отношению к 1980 году для UT=6.

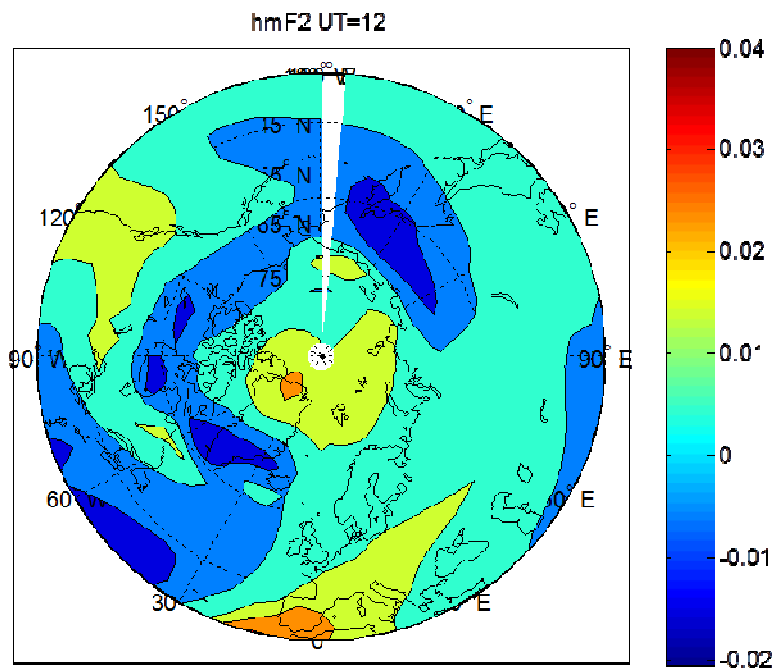


Рис. 2в. Относительное изменение hmF2 в 2014 году по отношению к 1980 году для UT=12.

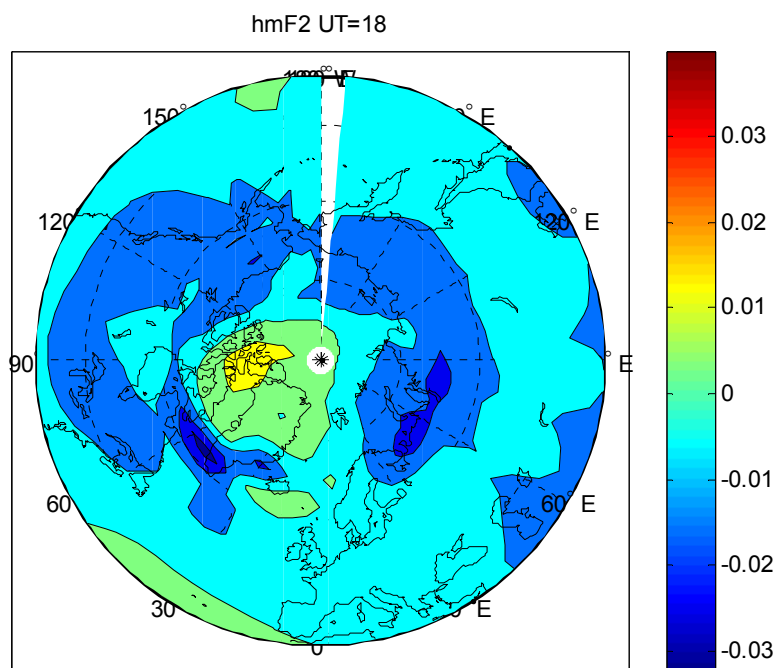


Рис. 2г. Относительное изменение hmF2 в 2014 году по отношению к 1980 году для UT=18.

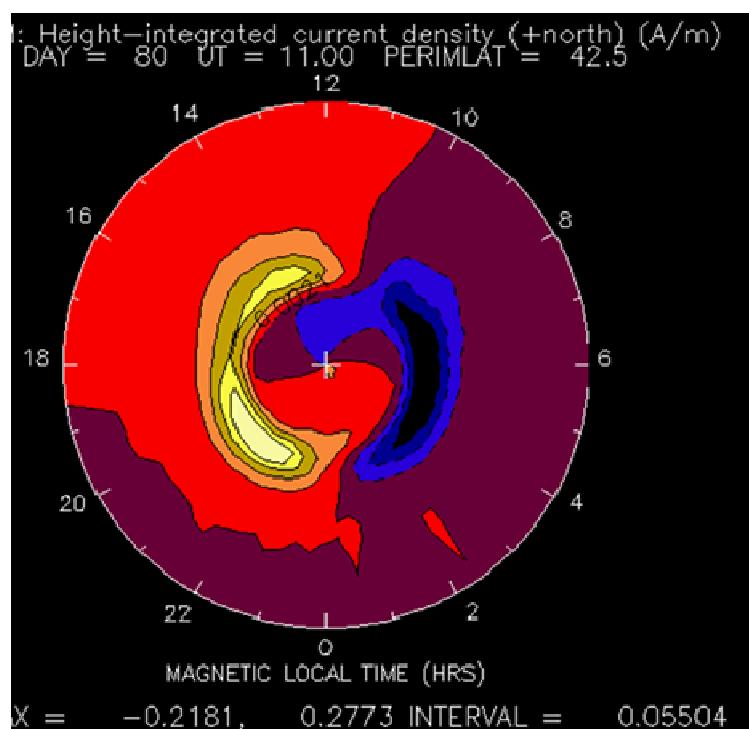


Рис. 3а. Распределение вертикально интегрированного электрического тока в ионосфере (меридиональная компонента) в 1980 году для UT=11.

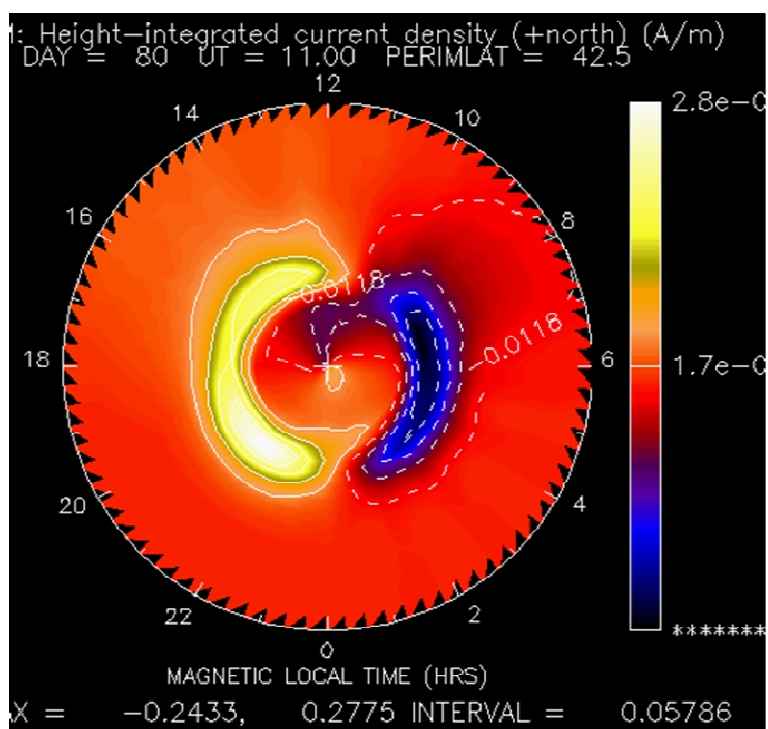


Рис. 3б. Распределение вертикально интегрированного электрического тока в ионосфере (меридиональная компонента) в 2014 году для UT=11.

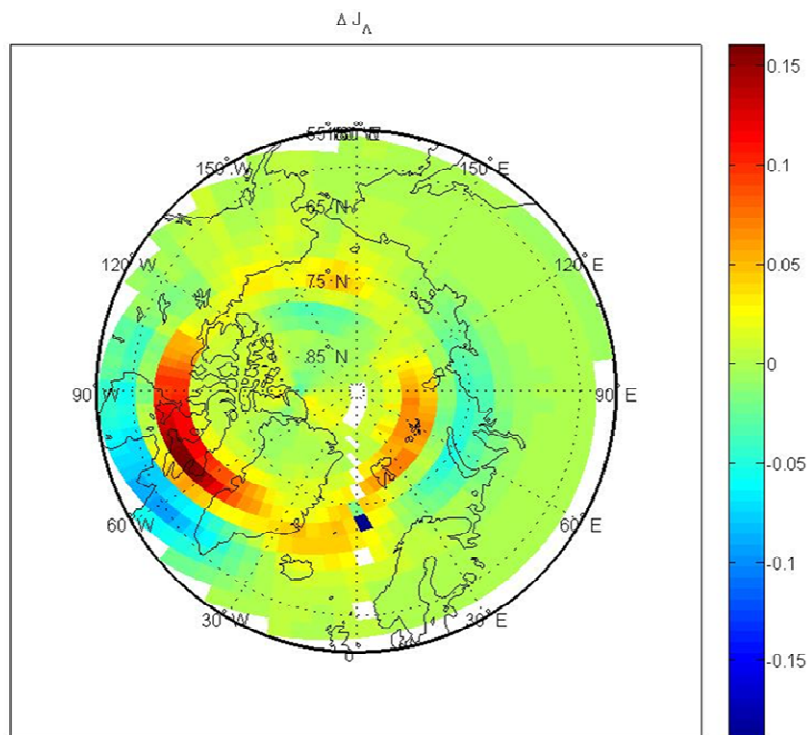


Рис. 4а. Относительное изменение вертикально интегрированного электрического тока в ионосфере (меридиональная компонента) в 2014 году по отношению к 1980 году.

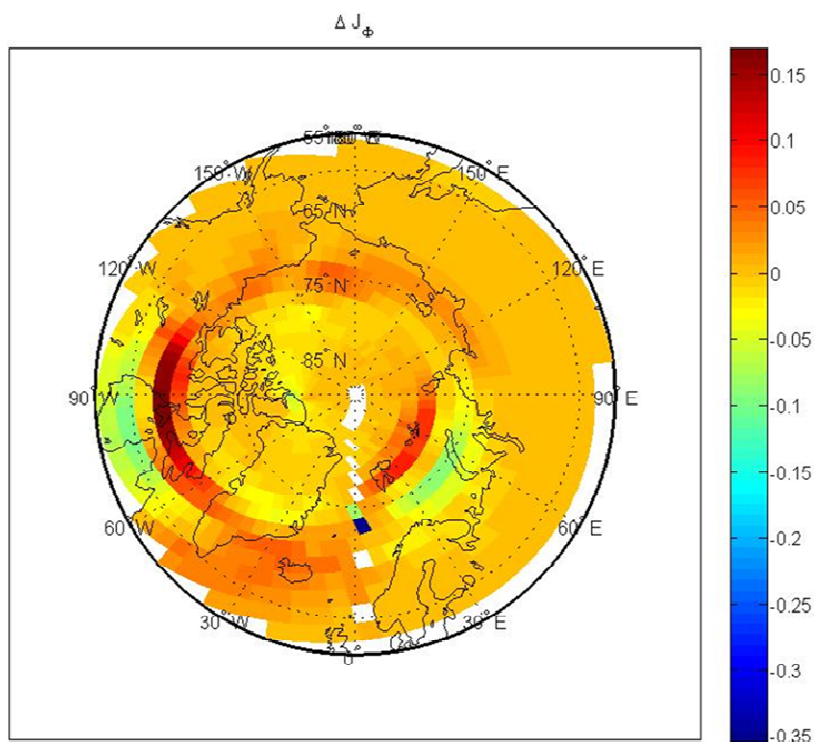


Рис. 4б. Относительное изменение вертикально интегрированного электрического тока в ионосфере (зональная компонента) в 2014 году по отношению к 1980 году.

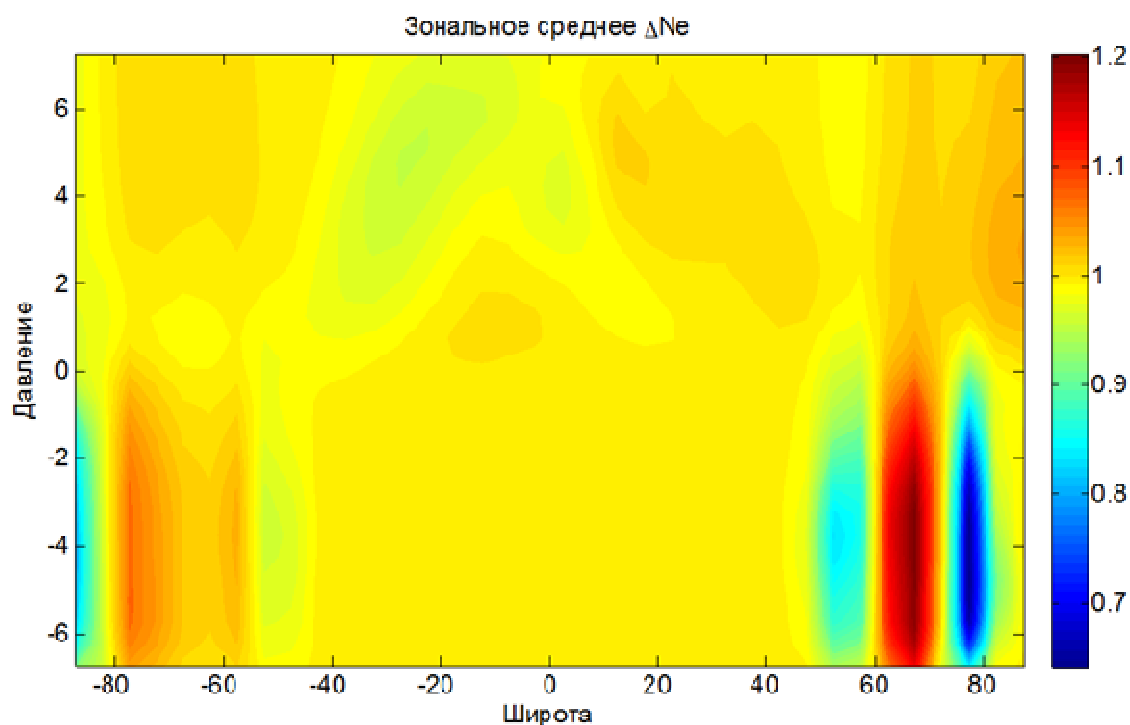


Рис. 5. Зональное среднее относительного изменения электронной концентрации в 2014 году по отношению к 1980 году.

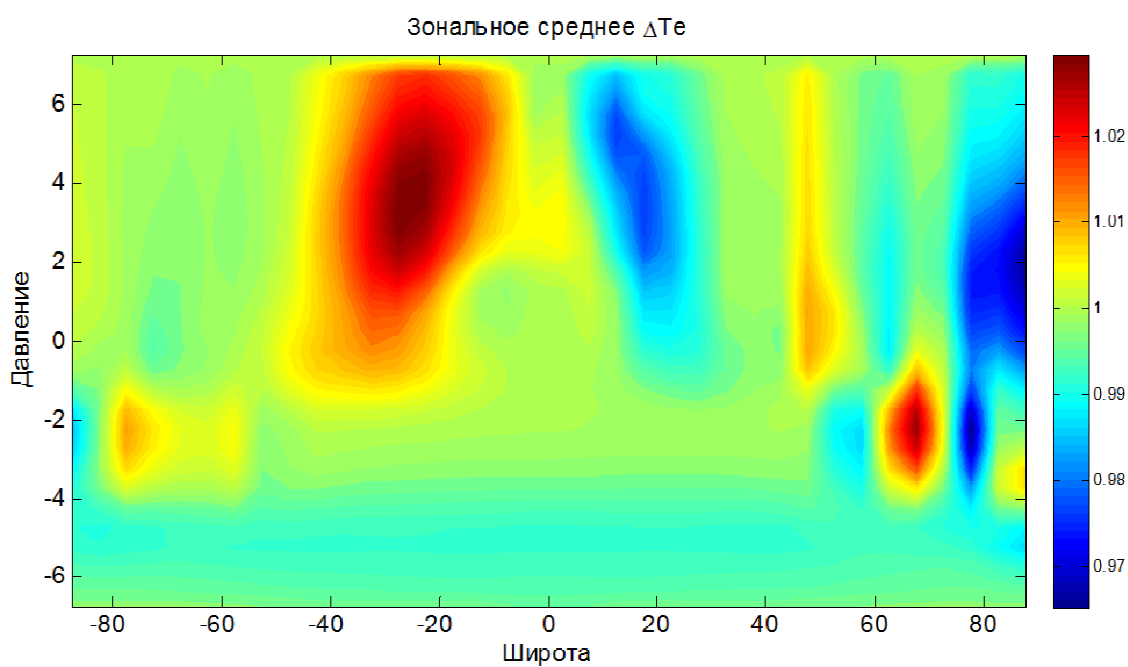


Рис. 6. Зональное среднее относительного изменения электронной температуры в 2014 году по отношению к 1980 году.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненное численное моделирование вариаций ионосферы при изменении геомагнитного поля в 1980-2014 годах показало, что, при фиксации всех остальных внешних параметров, в северном полушарии наблюдаются эффекты изменения электронной концентрации в максимуме F2 слоя на уровне  $\pm 15-40\%$  в высоких широтах. На практике эти эффекты маскируются геомагнитной активностью. Эффекты в южном полушарии выражены слабо. Наиболее вероятный физический

механизм – изменение фазового сдвига между магнитным и солнечным локальным временем. Пространственное распределение высыпаний и токов в геомагнитных координатах практически инвариантно, но изменение магнитного поля ведет к изменению отображения геомагнитных координат на географические, в которых рассчитываются эффекты солнечного излучения.

Прогноз распространения КВ радиоволн в Арктическом секторе РФ, в особенности северовосточных азимутов распространения должен использовать текущее состояние геомагнитного поля.

Необходимо также указать на необходимость ручной коррекции программного кода эмпирических моделей электрического поля и высыпаний, так как в некоторых случаях в этих моделях заданы константами устаревшие координаты геомагнитных полюсов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Manda M., Dormy E. Asymmetric behavior of magnetic dip poles // *Earth, Planets and Space*. 2003. V. 55, N 3. P.153–157.
2. Ляхов А.Н., Зецер Ю.И., Фуллер-Роуэлл Т. Возможные последствия смещения магнитных полюсов для структуры и динамики верхней атмосферы Земли // *ДАН*. 2006. Т. 409, № 5. С. 688–690.
3. Fuller-Rowell T., Rees D., Quegan S., et al. A coupled thermosphere–ionosphere model. *STEP Handbook on Ionospheric Models* /ed. R.W. Schunk. 1996. Utah State University. P. 217–238.
4. Qian, L., A. G. Burns, B. A. Emery, B. Foster, G. Lu, A. Maute, A. D. Richmond, R. G. Roble, S. C. Solomon, and W. Wangm, The NCAR TIE-GCM: A community model of the coupled thermosphere/ionosphere system, in *Modeling the Ionosphere-Thermosphere System*, AGU Geophysical Monograph Series, 2014.
5. Finlay, C.C., S. Maus, C.D. Beggan, et al. (2010), International Geomagnetic Reference Field: The eleventh generation, *Geophys. J. Int.*, 183, P.1216–1230.
6. Иванов-Холодный Г.С., Михайлов А.В. Прогнозирование состояния ионосферы. Ленинград, Гидрометеиздат, 1980. – 189 с.
7. Данилов А.Д. Восьмой симпозиум по трендам в атмосфере // *Гелиогеофизические исследования*. 2014. Вып. 10. С. 93 – 105.
8. Lin C.S., S. B. Cable, E. K. Sutton, F. A. Marcos, J. M. Retterer, and S. H. Delay Satellite Drag Validation of the Thermosphere-Ionosphere Electrodynamics General Circulation Model // *Air Force Research Laboratory. Technical Memorandum AFRL-RV-PS-TM-2013-0002*
9. I. Cnossen, Richmond A.D. Changes in the Earth’s magnetic field over the past century: Effects on the ionosphere-thermosphere system and solar quiet (Sq) magnetic variation // *J. Geophys. Res: SPACE PHYSICS*. 2013. V. 118. P.849–858. doi:10.1029/2012JA018447.
10. G. Toth, Sokolov I.V., Gombosi T.I., Chesney D.R. et al. Space Weather Modeling Framework: A new tool for the space science community // *J. Geophys. Res.* 2005. V.110. A12226. doi:10.1029/2005JA011126.

## THE NUMERICAL SIMULATION OF IONOSPHERE VARIATION CAUSED BY THE GEOMAGNETIC FIELD TREND

A.N. Lyakhov, T.V. Loseva, A.V. Chermenin, B.G. Gavrillov

NCAR TIEGCM model was used in the simulation of ionosphere response to the geomagnetic field change within 1980-2014. The ionosphere response is determined mainly by the phase shift between solar and magnetic local time. Simulated variations are not catastrophic, well masked by the geomagnetic activity, but must be taken into account in HF propagation prediction.

**KEYWORDS:** IONOSPHERE, GEOMAGNETIC FIELD, NUMERICAL SIMULATION