УДК 551.510.413.5
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-221
Orcid: 0000-0002-3869-4728

О ВЛИЯНИИ ВЫБОРА МОДЕЛИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИИ ВЫСОКОШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ

А.Ю. Гололобов[1, 2], В.И. Попов[1], И.А. Голиков[1]

[1]Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера
Сибирского отделения Российской академии наук, Якутск, Россия,
Gololobov@ikfia.ysn.ru
[2]Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова

INFLUENCE OF CHOICE OF THE EARTH'S MAGNETIC FIELD MODEL ON RESULTS OF NUMERICAL SIMULATION OF THE HIGH-LATITUDE IONOSPHERE

A.Yu. Gololobov[1, 2], V.I. Popov[1], I.A. Golikov[1]

[1]Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS, Yakutsk, Russia, Gololobov@ikfia.ysn.ru
[2] M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

Аннотация. В работе представлены результаты численных расчетов по модели высокоширотной ионосферы при использовании различных моделей магнитного поля Земли. Рассмотрены дипольное магнитное поле и модель IGRF-14. Показано, что неоднородности геомагнитного поля оказывают заметное влияние на пространственно-временную структуру высокоширотной ионосферы в возмущенные периоды. Эффект выбора модели геомагнитного поля в возмущенных условиях может достигать 25–30 %, что демонстрирует необходимость применения модели IGRF при сопоставлении результатов численных расчетов с экспериментальными данными.

Ключевые слова: высокоширотная ионосфера, магнитное поле, численное моделирование.

Abstract. This paper presents the results of numerical simulations using a high-latitude ionospheric model and various models of the Earth's magnetic field. A dipole magnetic field and the IGRF-14 model have been considered. It has been shown that geomagnetic field inhomogeneities have a significant impact on the spatiotemporal structure of the high-latitude ionosphere during disturbed periods and can lead to discrepancies of up to 25-30%, demonstrating the need to use the IGRF model when comparing numerical simulation results with experimental data.

Keywords: high-latitude ionosphere, magnetic field, numerical modeling.

ВВЕДЕНИЕ

При моделировании крупномасштабной структуры ионосферы часто геомагнитное поле задается в дипольном приближении. Данное допущение не учитывает неоднородности геомагнитного поля Земли, что может приводить к расхождениям рассчитанных параметров ионосферы и экспериментальных данных. Неоднородности геомагнитного поля могут оказывать существенное влияние на структуру F-области высокоширотной ионосферы, поскольку движение заряженных частиц в этой области подвержено влиянию магнитного поля. Поэтому целью настоящей работы является исследование влияния выбора модели магнитного поля Земли на крупномасштабную структуру высокоширотной ионосферы.

МОДЕЛЬ ВЫСОКОШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ

Настоящая работа проведена на основе модели F-области ионосферы в переменных Эйлера [Голиков и др., 2012, 2016, 2025]. Модель позволяет рассчитывать концентрацию электронов (n_e), температуры электронов (T_e) и ионов (T_i) в интервале высот 120 — 500 км в области выше 40° с.ш. в результате численного решения системы нестационарных трехмерных уравнений, состоящей из уравнений непрерывности для ионов, теплопроводности для электронов и ионов. В рассматриваемой области высот можно принять условие квазинейтральности, т.е. $n_e \approx \sum n_i$. Температура и концентрация нейтральных компонент рассчитывались по модели термосферы NRLMSISE-00 [Picone et al., 2002]. Для расчета распределения средних энергий и потоков энергии высыпающихся электронов использована модель авроральных высыпаний APM (Auroral Precipitation Model) [Vorobjev et al., 2013], а функция ионообразования высыпающимися частицами рассчитывается по формуле, предложенной в [Fang et al., 2008]. Скорости фотоионизации при больших зенитных углах Солнца ($\chi > 75°$) рассчитаны согласно [Chapman, 1931]. Расчеты проведены для условий средней солнечной активности ($F10.7=150$) и весеннего равноденствия ($\chi=0°$).

МОДЕЛЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ IGRF-14

Модель IGRF (International Geomagnetic Reference Field) разработана и поддерживается Международной ассоциацией геомагнетизма и аэрономии (IAGA) [Beggan et al., 2026]. Представление геомагнитного поля основано на сферических гармонических функциях. IGRF-14 имеет 13 степеней (n), содержащих 195 гармонических коэффициентов. На рис. 1 представлены распределения напряженности геомагнитного поля по модели IGRF-14 с учетом разного количества степеней. Как видно, первая

степень представляет собой диполь, центрированный относительно геомагнитных полюсов. На полюсах напряженность геомагнитного поля достигает около $5\cdot10^4$ нТл, а на экваториальных широтах — $2.7\cdot10^4$ нТл. Увеличение количества степеней приводит к образованию неоднородностей геомагнитного поля (рис. 1, *б*, *в*). При учете всех 13 степеней в распределении напряженности геомагнитного поля формируются четыре локальные магнитные аномалии (рис. 1, *г*). В Северном полушарии две континентальные аномалии — Восточносибирская магнитная аномалия (~$6\cdot10^4$ нТл) и Канадская магнитная аномалии (~$5.9\cdot10^4$ нТл). А в Южном полушарии — Бразильская (Южно-Атлантическая) магнитная аномалия (~$2.3\cdot10^4$ нТл) и Анктарктическая магнитная аномалия (~$5.8\cdot10^4$ нТл).

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТОВ

На рис. 2 представлены распределения напряженности геомагнитного поля (*а*, *б*) и максимума концентрации слоя F2 ионосферы n_mF2 (*г*, *д*, *ж*, *з*) в экваториальной плоскости и разницы между ними (*в*, *е*, *и*) для спокойных (B_z=0 нТл) и возмущенных (B_z=–6 нТл) условий в Северном полушарии, рассчитанные с применением дипольной модели и модели IGRF-14. На рис. 2, *б* видно, что геомагнитное поле по модели IGRF-14 имеет два локальных максимума в Восточном и Западном полушариях. Рисунок 2, *в* демонстрирует различие между панелями *б* и *а*. Видно, что в вечернем и утреннем секторах наблюдаются отрицательные изменения ΔB (~–0.05 Гс), а в полуночном и полуденном секторах — положительные (~0.1 Гс). Данные изменения будут влиять на скорость электромагнитного дрейфа $\vec{u} = \frac{\vec{E}\times\vec{B}}{B^2}$ под действием крупномасштабного электрического поля магнитосферной конвекции. В области положительных ΔB происходит увеличение скорости дрейфа $\vec{u}$, а при отрицательных ΔB — уменьшение $\vec{u}$. Рассмотрим влияние изменения напряженности геомагнитного поля на распределение n_mF2. Как видно из рис. 2, *е*, разница между результатами численных расчетов для спокойных условий достигает всего $\pm10^4$ см$^{-3}$. Однако при возмущенных условиях эффекты учета неоднородностей геомагнитной поля усиливаются и разница между результатами достигает $\pm3\cdot10^4$ см$^{-3}$. Таким образом, учет неоднородностей геомагнитного поля не оказывается существенного влияния на результаты моделирования для спокойных условий, однако в возмущенные периоды влияние неоднородностей геомагнитного поля может быть заметным.

Рассмотрим влияние выбора модели магнитного поля Земли с учетом изменения системы геомагнитных координат. На рис. 3 представлены различия между магнитной дипольной системой координат (черные изолинии) и скорректированными геомагнитными координатами [Gustafsson et al., 1992; Shepherd, 1994], рассчитанными с применением модели IGRF (красные изолинии).

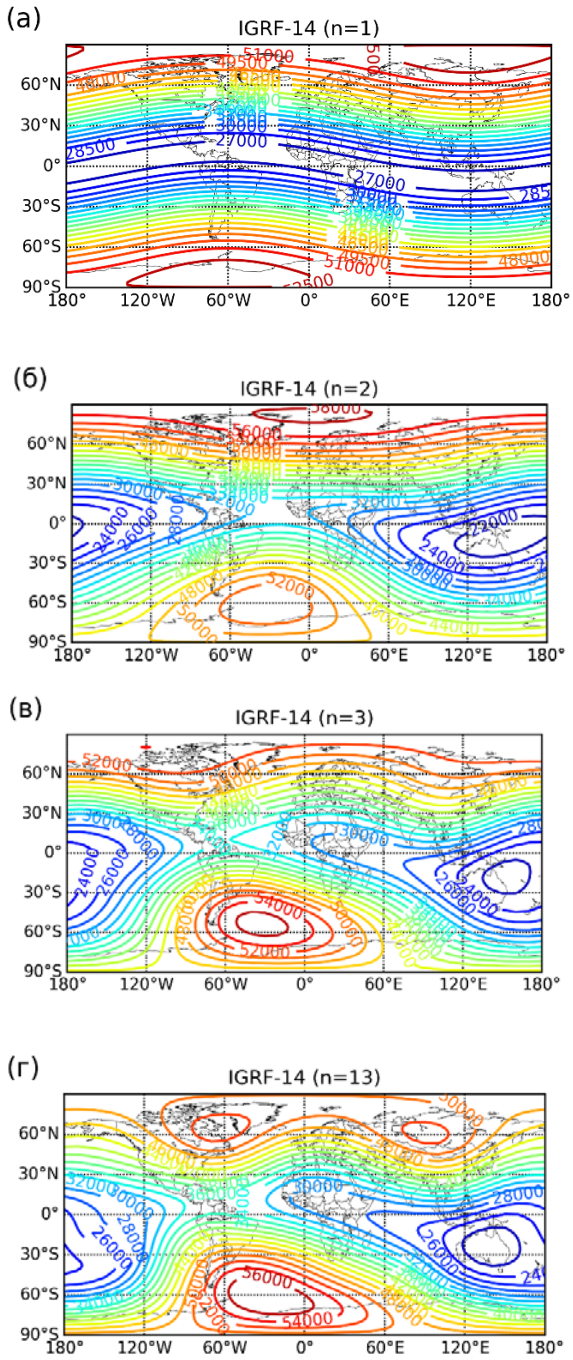

Рис. 1. Распределение напряженности геомагнитной поля по модели IGRF-14 (в нТл) с учетом 1, 2, 3 и 13 степеней

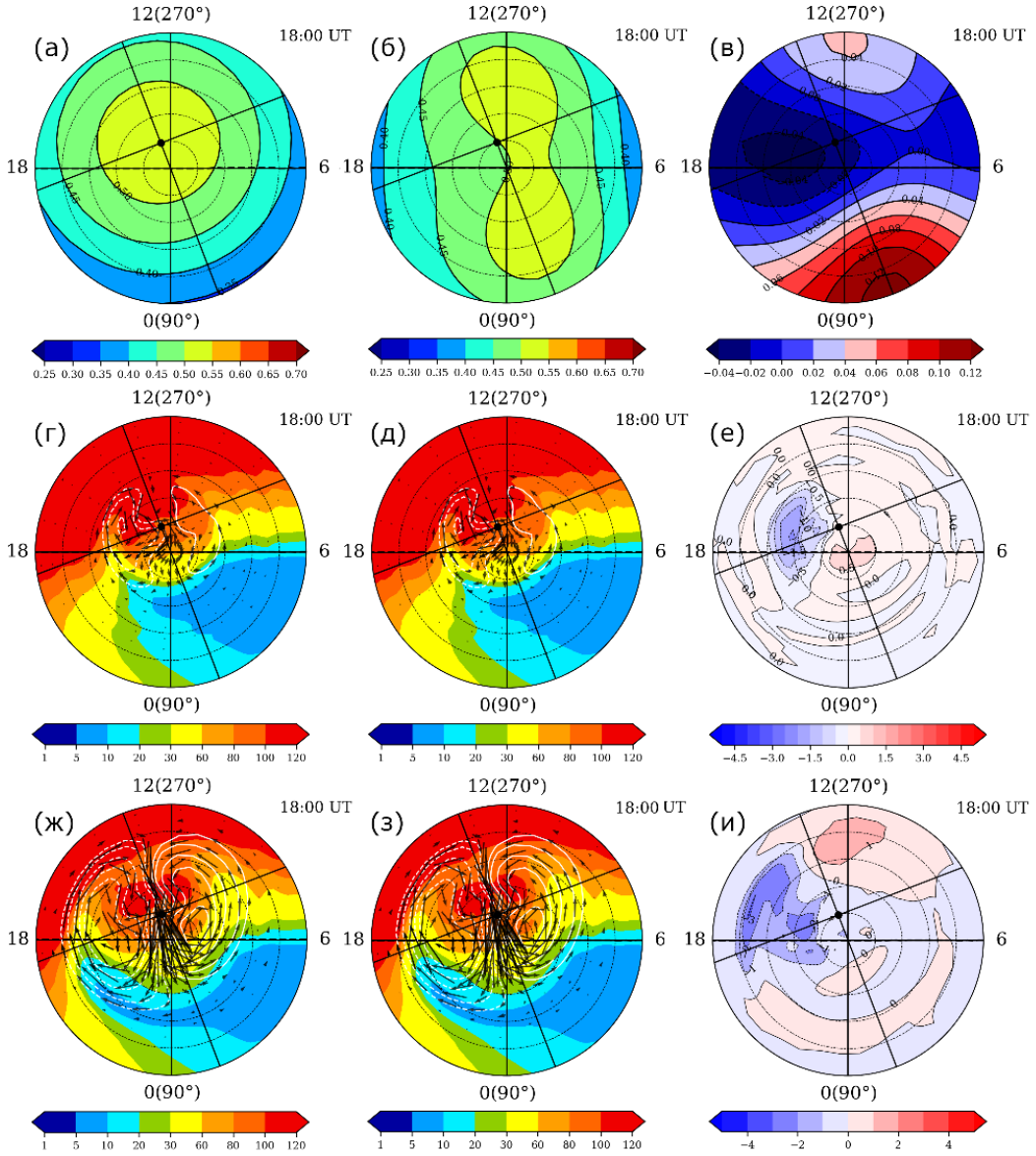

Рис. 2. Распределения напряженности геомагнитного поля B (в Гс) и n_mF2 (в ед. 10^4 см$^{-3}$) для магнитного поля в дипольном приближении (*а*, *г*, *ж*) и магнитного поля по модели IGRF-14 (*б*, *д*, *з*). Справа (*в*, *е*, *и*) показана разница ΔB (*в*) и Δn_mF2 (*е*, *и*) между двумя вариантами расчетов

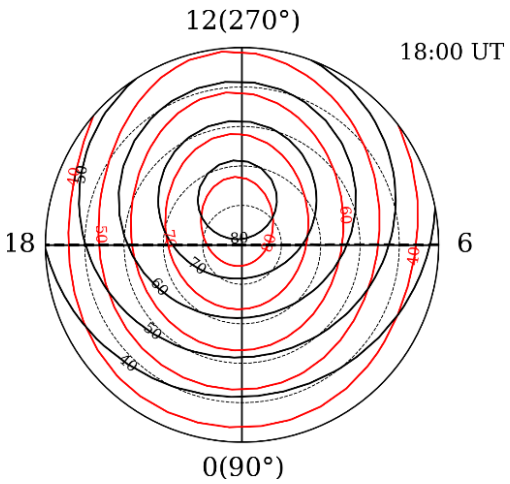

Рис. 3. Распределение геомагнитной широты по магнитной дипольной системе координат (черные изолинии) и по скорректированным геомагнитным координатам (красные изолинии) в 18 UT

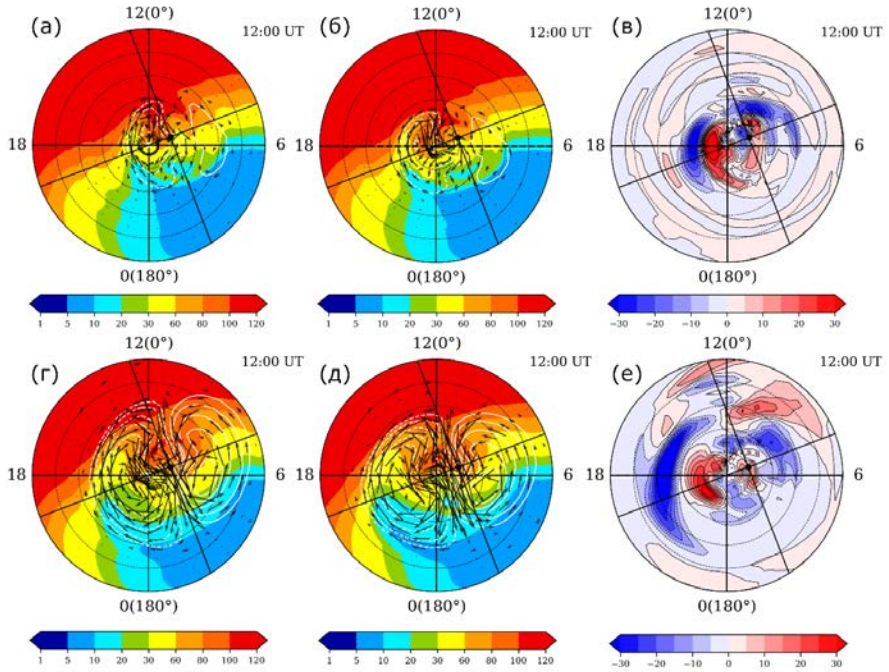

Рис. 4. Распределения n_mF2 (в 10^4 см$^{-3}$), рассчитанных по модели магнитного поля в дипольном приближении (*а*, *г*) и по модели IGRF-14 (*б*, *д*), и разницы между ними (*в*, *е*; в 10^4 см$^{-3}$) в 12 UT

Расчеты, проведенные с применением данных систем координат, представлены на рис. 4. Между результатами численных расчетов наблюдаются существенные расхождения, достигающие ~30×10^4 см$^{-3}$ и более, что составляет около 25–30 % от дневного максимума концентрации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе проведено исследование влияния выбора модели магнитного поля Земли на распределение n_mF2 в высокоширотной ионосфере. Анализ результатов численных расчетов с дипольной моделью геомагнитного поля и с моделью IGRF-14 показал, что выбор модели геомагнитного поля существенно влияет на распределение n_mF2 и может приводить к расхождению результатов до 25–30 %, что демонстрирует необходимость применения модели IGRF при сопоставлении результатов численных расчетов с экспериментальными данными.

Работа выполнена в рамках государственного задания (№ FWRS-2026-0058).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Голиков И.А., Гололобов А.Ю., Попов В.И. Численное моделирование теплового режима высокоширотной ионосферы // Вестник Северо-Восточного федерального университета. 2012. Т. 9, № 3. С. 22–28.

Голиков И.А., Гололобов А.Ю., Попов В.И. Моделирование распределения температуры электронов в области F2 высокоширотной ионосферы для условий зимнего солнцестояния // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2, № 4. С. 54–62.

Гололобов А.Ю., Голиков И.А., Попов В.И. Моделирование влияния магнитной бури на крупномасштабную структуру высокоширотной ионосферы для зимних условий // Солнечно-земная физика. 2025. Т. 2, № 2. С. 100–111. DOI: 10.12737/szf-112202509.

Beggan C., Soloviev A., Kudin D., et al. International Geomagnetic Reference Field – The fourteenth generation // Earth, Planets and Space. 2026. DOI: 10.5281/zenodo.14218973.

Chapman S. The absorption and dissociative of ionizing effect of monochromatic radiation in an atmosphere on a rotation // Earth. Proc. Phys. Soc. 1931. V. 43. P. 483–501. DOI:10.1088/0959-5309/43/5/302.

Fang X., Randall C., Lummerzheim D., Solomon S. Electron impact ionization: A new parameterization for 100 eV to 1 MeV electrons // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. DOI: 10.1029/2008JA013384.

Gustafsson G., Papitashvili N.E., Papitashvili V.O. A Revised Corrected Geomagnetic Coordinate System for Epochs 1985 and 1990 // J. Atmos. Terr. Phys. 1992. V. 54. P. 1609–1631.

Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., Aikin A. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparison and scientific issues // J. Geophys. Res. 2002. V. 107. P. 1501–1516. DOI: 10.1029/2002JA009430.

Shepherd S.G. Altitude-adjusted corrected geomagnetic coordinates: Definition and functional approximations // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2014. V. 119, iss. 9. P. 7501–7521.

Vorobjev V.G., Yagodkina O.I., Katkalov Yu.V. Auroral Precipitation Model and its application to ionospheric and magnetospheric studies // J. Atmos. and Solar-Terr. Phys. 2013. V. 102. P. 157–171. DOI:10.1016/j.jastp.2013.05.007.