Секция В. Физика атмосферы Земли, включая околоземное космическое пространство. БШФФ-2026. С. 217–220.

УДК 551.510.413.5
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-217
ORCID: 0000-0002-3869-4728

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКЛИКА ВЫСОКОШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ НА ГЕОМАГНИТНУЮ БУРЮ 1 ЯНВАРЯ 2025 Г.

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

MODELING OF THE HIGH-LATITUDE IONOSPHERE RESPONSE TO GEOMAGNETIC STORM ON 1 JANUARY 2025

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. На основе модели высокоширотной ионосферы проведено исследование отклика ионосферы на геомагнитную бурю 1 января 2025 г. Показано, что во время бури наблюдаются как положительные, так и отрицательные возмущения, в которых проявляется долготная зависимость. Так, в период геомагнитной бури на восточных долготах наблюдаются в основном положительные возмущения, тогда как на западных долготах в начале возмущения регистрируется положительный эффект, который затем сменяется отрицательным эффектом на главной фазе бури и в начале фазы восстановления.

Ключевые слова: высокоширотная ионосфера, геомагнитная буря, численное моделирование.

Abstract. Using a high-latitude ionospheric model, a study was conducted of the ionospheric response to a geomagnetic storm of January 1, 2025. It was shown that both positive and negative disturbances, which exhibit a longitudinal dependence, were observed during the storm. Thus, during the geomagnetic storm, predominantly positive disturbances were observed at eastern longitudes, while at western longitudes, a positive storm effect was recorded at the onset of the disturbance, which then gave way to a negative effect during the main phase of the storm and at the beginning of the recovery phase.

Keywords: high-latitude ionosphere, geomagnetic storm, numerical modeling.

ВВЕДЕНИЕ

Геомагнитная буря, вызванная воздействием возмущенного солнечного ветра на магнитосферу Земли, оказывает значительное влияния на состояние околоземной плазмы, включая ионизированную часть верхней атмосферы Земли — ионосферу. Отклик ионосферы на геомагнитную бурю называют ионосферной бурей, в которой выделяют положительную и отрицательную фазы. Эффекты ионосферной бури обусловлены сложной цепочкой солнечно-земных связей. Наиболее сильно они проявляются в высоких широтах, где состояние ионосферы определяется главным образом конфигурацией крупномасштабной магнитосферной конвекции и ионизацией за счет высыпающихся заряженных частиц.

Исследования эффектов геомагнитных бурь в ионосфере по данным наземных и спутниковых измерений проведены во множестве работ, основные результаты которых описаны в обзорных статьях [Buonsanto, 1999; Danilov, Lastovicka, 2001]. В настоящее время известно, что одним из важных факторов ионосферной бури, наряду с высыпаниями заряженных частиц и магнитосферной конвекцией, является изменение состава нейтральной атмосферы во время геомагнитной бури [Fuller-Rowell et al., 1994; Romanova et al., 2006; Клименко и др., 2016]. Поскольку скорость фотоионизация зависит от концентрации атомарного кислорода [O], а скорость рекомбинации зависит во многом от концентрации молекулярного азота [N_2], то изменение отношения R = [O]/[N_2], характеризующего состав верхней атмосферы, будет влиять на ионосферу. Уменьшение R будет вести к понижению концентрации электронов n_e (отрицательная фаза бури), а его увеличение — к росту n_e (положительная фаза бури). Fuller-Rowell и др. [1994] на основе численных расчетов по модели CTIM (Coupled Thermosphere-Ionosphere Model) для равноденственных условий показали, что важное значение имеет также изменение направления нейтрального ветра.

В работах [Гололобов и др., 2024; Гололобов и др., 2025] на основе численной модели высокоширотной ионосферы проведено исследование влияния геомагнитных возмущений на крупномасштабную структуру ионосферы во время умеренной геомагнитной бури для зимних условий. Однако в этих работах основное внимание уделено влиянию горизонтального и вертикального переноса за счет электрического поля магнитосферной конвекции и корпускулярной ионизации. При этом влияние изменения состава нейтральной атмосферы и термосферного ветра не рассматривалось. Поэтому целью настоящей работы является исследование отклика ионосферы на геомагнитные возмущения в зимний период с помощью нестационарной модели высокоширотной ионосферы в переменных Эйлера на примере бури 1 января 2025 г.

МОДЕЛЬ ВЫСОКОШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ

Настоящая работа проведена на основе модели F-области ионосферы в переменных Эйлера [Голиков и др., 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 полярнее 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]. В настоящей работе для учета нейтрального ветра, в отличие от [Gololobov et al., 2025], интегрирована модель HWM-14 (Horizontal Wind Model) [Hedin et al., 1993; Drob et al., 2015], позволяющая рассчитывать картину термосферных ветров для разных гелио-геофизических условий. 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]. Для описания магнитосферной конвекции в настоящей работе используется эмпириче-ская модель электрического потенциала в высокоширотной ионосфере Веймера [Weimer, 1996].

ГЕОМАГНИТНАЯ БУРЯ 1 ЯНВАРЯ 2025 Г.

На рис. 1 представлены вариации параметров солнечного ветра и индексов геомагнитной активности с 30 декабря 2024 г. по 2 января 2025 г. с пиком интенсивности *Dst*=–211 нТл в 16–17 UT 1 января 2025 г. (рис. 1, *а*). Параметры солнечного ветра показаны на рис. 1, *б* и *в*. Вариации индексов геомагнитной активности *Ap*, *AL* представлены на рис. 1, *г* и *д*. На рис. 1, *а* видно, что около 16 UT 31 декабря 2024 г. наблюдается внезапное начало бури (SSC), во время которой регистрируется резкий подъемом скорости и концентрации солнечного ветра (рис. 1, *в*), повышение B_y-компоненты ММП до +21 нТл и *Dst* до +17 нТл. После начала возмущений *Dst*-индекс плавно падает до около –30 нТл, а ММП периодически принимает южную ориентацию. Затем 1 января 2025 г. около 8 UT наблюдается начало главной фазы бури, совпадающее с резким изменением ориентации ММП на юг ($B_z \approx -20$ нТл). B_z-компонента ММП сохраняет южную ориентацию до ~18 UT, т. е. всю главную фазу бури продолжительностью около 10 ч. Во время бури индекс *Ap* постепенно повышается с пиком ~200 нТл в 15–18 UT 1 января 2025 г., при этом индекс *AL* варьирует в интервале от –100 до –2000 нТл.

В настоящей работе проведены численные расчеты по модели ионосферы для условий, соответствующих периоду с 30 декабря 2024 г. по 2 марта 2025 г. с шагами по времени Δt=5 мин, по долготе $\Delta\varphi$=10°, по широте $\Delta\theta$=2° и по высоте Δh=10 км. Индекс солнечной активности *F10.7* принят равным 220 sfu. Вариации индексов геомагнитной активности заданы в качестве входных параметров: уровень геомагнитной активности для моделей NRLMSISE-00 и HWM-14 задан на основе вариации *Ap*; модель APM для расчета потоков и энергий высыпающихся заряженных частиц использует *AL* и *Dst*. Электрическое поле магнитосферной конвекции задано по модели Веймера [Weimer, 1996] на основе параметров ММП и солнечного ветра B_z, B_y, V_{SW}.

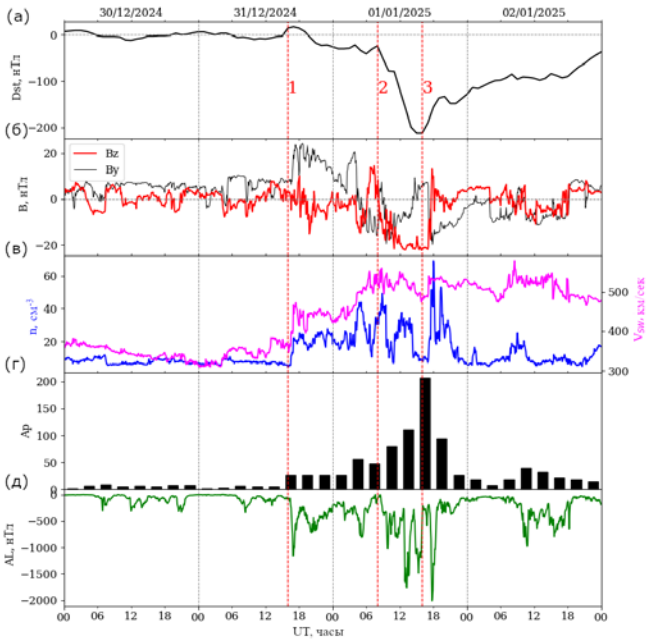

Рис. 1. Вариации индекса геомагнитной активности *Dst* (*а*), B_z- и B_y-компонент межпланетного магнитного поля (*б*), концентрации и скорости солнечного ветра (*в*), индексов геомагнитной активности *Ap* (*г*) и *AL* (*д*) с 30 декабря 2024 г. по 2 января 2025 г. Вертикальными красными штриховыми линиями показаны фазы развития бури: 1 — начальная фаза, 2 — главная фаза, 3 — фаза восстановления

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТОВ

На рис. 2 представлены результаты численных расчетов пространственно-временного распределения максимума концентрации электронов F2 слоя (n_mF2) в разные моменты в спокойный день 30 декабря 2024 г. (рис. 2, *а–в*) и в период геомагнитной бури 1 января 2025 г (рис. 2, *г–е*). Показаны моменты 06, 14 и 20 UT, соответствующие начальной фазе, главной фазе и началу фазы восстановления. Внизу показана разница Δn_mF2 между расчетами для возмущенных и спокойных условий, которая позволяет выявить эффекты геомагнитной бури (рис. 2, *ж–и*).

Из рис. 2, *а–в* видно, что при спокойных условиях изменения n_mF2 связаны с несовпадением географического и геомагнитного полюсов (UT-контроль). Так, в 06 UT вследствие несовпадения полюсов геомагнитный полюс и область конвекции и высыпаний заряженных частиц полностью находятся на ночной стороне, где наблюдается отрыв языка ионизации от дневной ионосферы. Оторвавшийся язык ионизации поддерживается лишь совместным действием корпускулярной ионизации и конвекции (рис. 2, *а*). В 14 и 20 UT геомагнитный полюс смещается на дневную сторону, вследствие этого магнитосферная конвекция частично заходит на освещенную область выше терминатора и начинает заносить дневную ионизацию на ночную сторону антисолнечной конвекцией, формируя язык ионизации (рис. 2, *б, в*).

При возмущенных условиях в 06 UT наблюдается положительный эффект бури в виде расширения оторвавшегося языка ионизации и повышения n_mF2 (рис. 2, *г, ж*). Положительный эффект бури наблюдается также и на дневной стороне выше терминатора в виде увеличения n_mF2 на 30×10^4 см$^{-3}$ (рис. 2, *д*). На главной фазе бури в 14 UT магнитосферная конвекция существенно усиливается, а область ее действия расширяется и охватывает освещенную сторону выше терминатора. В этой области наблюдается отрицательный эффект бури вследствие интенсивного выноса оттуда дневной ионизации на ночную сторону конвекцией (рис. 2, *д, з*), а в полярной области выше 80° с.ш. формируются повышенные значения n_mF2. На средних широтах в вечернем секторе в интервале 12–24 LT наблюдается положительный эффект бури (рис. 2, *з*). Момент 20 UT соответствует фазе восстановления бури. В это время геомагнитный полюс смещается в послеполуденный сектор (рис. 2, *е*), а конвекция ослабевает. На широтах выше ~80° с.ш. формируется полярная полость, где n_mF2 < 5×10^4 см$^{-3}$ (рис. 2, *е*). На средних широтах наблюдается отрицательный эффект бури в интервале 10–20 LT и в полярной области (рис. 2, *и*).

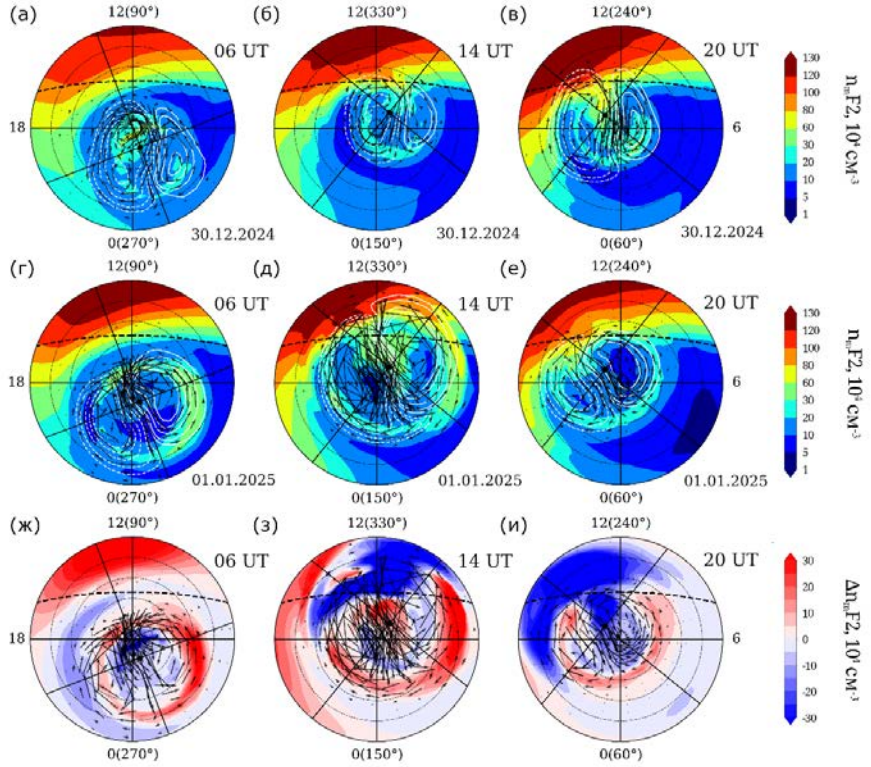

Рис. 2. Распределение максимума концентрации F2-слоя ионосферы n_mF2 (в 10^4 см$^{-3}$), рассчитанное на модели высокоширотной ионосферы для 30 декабря 2024 г. (*а–в*) и 1 января 2025 г (*г–е*), и разницы между ними Δn_mF2 (*ж–и*). Концентрические окружности соответствуют географическим широтам Северного полушария, проведенным через 10°. Нижняя граница соответствует 40° с.ш. Цифры у внешнего круга — местное время, рядом в скобках — географическая долгота. Черная штриховая линия — положение терминатора при зенитном угле $\chi = 90°$. Точка пересечения двух взаимно перпендикулярных линий — геомагнитный полюс, который отстоит от географического на 11.5°. Стрелками показаны скорости дрейфа ионосферной плазмы, обусловленные электрическим полем магнитосферной конвекции. Белые изолинии (*а–е*) — потенциалы электрического поля, рассчитанные по модели Веймера

На рис. 2, *ж–и* видно, что на всех фазах геомагнитной бури на восточных долготах наблюдаются преимущественно положительные возмущения, тогда как на западных долготах на главной фазе и в начале фазы восстановления формируются отрицательные возмущения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе проведено исследование отклика высокоширотной ионосферы на геомагнитную бурю в зимний период на основе численного моделирования состояния ионосферы с 30 декабря 2024 г. по 2 января 2025 г. По результатам численных расчетов показано, что во время бури наблюдались как отрицательные, так и положительные возмущения. Их эффект зависит от долготы и широты. На восточных долготах во время бури наблюдались преимущественно положительные возмущения, тогда как на западных долготах на начальной фазе бури регистрируется положительный эффект, который сменяется отрицательным эффектом на главной фазе бури и в начале фазы восстановления.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 25-17-20002).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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.

Клименко В.В., Карпачев А.Т., Клименко М.В. и др. Широтная структура долготного эффекта в ночной ионосфере в период летнего и зимнего солнцестояния // Химическая физика. 2016. Т. 35, № 1. С. 21–30.

Buonsanto M.J. Ionospheric storms – A review // Space Sci. Rev. 1999. V. 88. P. 563–601.

Danilov A.D., Lastovicka J. Effects of geomagnetic storms on the ionosphere and atmosphere // Intern. J. Geomagn. and Aeron. 2001. V. 2, N 3. P. 209–224.

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. Vol. 113, A09311. DOI:10.1029/2008JA013384.

Fuller-Rowell T.J., Codrescu M.V., et al. Response of the thermosphere and ionosphere to geomagnetic storms // J. Geophys. Res. 1994. V. 99, N A3. P. 3893–3914.

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.

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.

Hedin A.E., Fleming E.L., Manson A.H., et al. Empirical wind model for the upper, middle and lower atmosphere // J. Atmos. Terr. Phys. 1996. V. 58, iss. 13. P. 1421–1447, DOI:10.1016/0021-9169(95)00122-0.

Romanova E.B., Taschilin A.V., Polekh N.M., Stepanov A.E. Modeling of the seasonal effects of geomagnetic storms in the Eastern Asian ionosphere // Geomagnetism and Aeronomy. 2006. V. 6, N GI3003. DOI: 10.1029/2005GI000119.

Weimer D.R. A flexible, IMG dependent model of high-latitude electric potentials having “space weather” applications // Geophys. Res. Letters. 1996. V. 23, N. 18. P. 2549–2552.