
МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНОЙ БУРИ НА КРУПНОМАСШТАБНУЮ СТРУКТУРУ ВЫСОКОШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ ДЛЯ ЗИМНИХ УСЛОВИЙ

MODELLING THE INFLUENCE OF MAGNETOSPHERIC STORM ON THE LARGE-SCALE STRUCTURE OF THE HIGH-LATITUDE IONOSPHERE FOR WINTER SOLSTICE CONDITIONS

А.Ю. Гололобов *Институт космических исследований и аэронауки
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Якутск, Россия, Gololobov@ikfia.ysn.ru***И.А. Голиков***Институт космических исследований и аэронауки
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Якутск, Россия, gia2008n@mail.ru***В.И. Попов***Институт космических исследований и аэронауки
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Якутск, Россия, volts@mail.ru***A.Yu. Gololobov***Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research
and Aeronomy SB RAS,
Yakutsk, Russia, Gololobov@ikfia.ysn.ru***I.A. Golikov***Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research
and Aeronomy SB RAS,
Yakutsk, Russia, gia2008n@mail.ru***V.I. Popov***Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research
and Aeronomy SB RAS,
Yakutsk, Russia, volts@mail.ru*

Аннотация. На основе численных расчетов по модели высокоширотной ионосферы в эйлеровых переменных исследовано влияние возмущенной магнитосферной конвекции на крупномасштабную структуру ионосферы во время умеренной геомагнитной бури для условий зимнего солнцестояния. Показано, что возмущенное электрическое поле конвекции приводит к изменению форм и размеров основных структурных образований ионосферы. Выявлена зависимость эффекта влияния геомагнитной бури от времени начала возмущения вследствие несовпадения географического и геомагнитного полюсов (UT-контроль). Эффект наиболее выражен в случае бури с началом в 16 UT, когда возмущенное электрическое поле магнитосферной конвекции выносит плазму из дневной ионосферы на ночную сторону. Установлено, что в возмущенные периоды существенное влияние оказывает, наряду с горизонтальной компонентой электромагнитного дрейфа, его вертикальная компонента, которая приводит к увеличению высоты максимума F2-слоя на дневной стороне ионосферы и уменьшению на ночной.

Ключевые слова: магнитосферная конвекция, магнитная буря, модель ионосферы, высокоширотная ионосфера, субавроральная ионосфера, несовпадение полюсов.

Abstract. Using numerical calculations with a model of the high-latitude ionosphere in Eulerian variables, we study the influence of magnetospheric convection on the large-scale structure of the ionosphere during a moderate geomagnetic storm for winter solstice conditions. The disturbed electric field of convection is shown to cause changes in the shapes and sizes of the main structural formations of the ionosphere. We have found out that the effect of a geomagnetic storm depends on the time of the beginning of the disturbance due to the mismatch between the geographic and geomagnetic poles (UT control). The effect is most pronounced in the case of a storm that begins at 16 UT, when the disturbed electric field of magnetospheric convection transfers plasma of the daytime ionosphere to the nightside. It is shown that during periods of disturbances along with the horizontal component of the electromagnetic drift its vertical component, which causes an increase in the height of the F2-layer maximum on the dayside and its decrease on the nightside, also has a significant effect.

Keywords: magnetospheric convection, magnetic storm, ionosphere model, high-latitude ionosphere, subauroral ionosphere, mismatch of poles.

ВВЕДЕНИЕ

Высокоширотная ионосфера характеризуется наличием регулярных крупномасштабных структурных образований, таких как язык ионизации и полярная полость в высоких широтах, полярный и авроральный пики в области дневного каспа и в ночном секторе, а также главный ионосферный провал (ГИП) в субавроральных широтах [Мизун, 1980]. Во время геомагнитных бурь конфигурация данных образований

существенно усложняется, что вызвано главным образом возмущением крупномасштабного электрического поля магнитосферной конвекции, которая контролируется ориентацией межпланетного магнитного поля (ММП). В зависимости от ориентации ММП магнитосферная конвекция может иметь двухвихревую, трехвихревую и четырехвихревую структуру [Неппнер, Маунард, 1987]. Вариации ММП в периоды бурь обуславливают нестационарный характер

конвекции и приводят к существенному изменению крупномасштабной структуры ионосферы. Реакция ионосферы на геомагнитные бури наиболее заметна на главной фазе бури. Выделяют положительные и отрицательные ионосферные возмущения, соответственно приводящие к локальному повышению и понижению концентрации электронов n_e [Prölss, 1995; Данилов, 2013; Ратовский и др., 2018; Клименко и др., 2015]. Изменение распределения n_e в периоды геомагнитных бурь влияет на распространение радиоволн и на точность позиционирования глобальных навигационных спутниковых систем.

Влияние электрического поля конвекции на крупномасштабную структуру высокоширотной ионосферы в возмущенные периоды на основе численных моделей исследовалось неоднократно [Клименко, Намгаладзе, 1976; Мингалев, 1978; Жеребцов и др., 1988; Уваров, Барашков, 1989; Tashchilin, Romanova, 2002, 2007; Уваров, Лукьянова, 2014; Uvarov, Lukianova, 2015; Lukianova et al., 2016; Liu et al., 2017; Ларина, Глебова, 2019; Klimentko et al., 2019]. В первых работах по изучению влияния магнитосферной конвекции использовались модели, построенные на формализме Лагранжа в предположении совпадения географического и геомагнитного полюсов. В работах [Уваров, Лукьянова, 2014; Uvarov, Lukianova, 2015] исследовано влияние различных типов конвекции на структуру высокоширотной ионосферы и показано, что изменение ориентации ММП ведет к перестройке крупномасштабной структуры высокоширотной ионосферы. Позже было проведено исследование влияния ММП на крупномасштабную структуру высокоширотной ионосферы с учетом несовпадения географического и геомагнитного полюсов в стационарных условиях [Lukianova et al., 2016]. В статье [Ларина, Глебова, 2019] рассмотрена реакция высокоширотной ионосферы на скачкообразное изменение знака B_y -компоненты ММП и установлено, что смена знака B_y -компоненты сопровождается расслоением языка ионизации и образованием крупномасштабных пятен ионизации. Deng и Ridley [2006] на основе численной модели GITM (Global Ionosphere-Thermosphere Model) и модели электрического поля Веймера [Weimer, 1996] исследовали отклик ионосферы на внезапное возмущение электрического поля конвекции в 12:00 UT. Ими было выявлено, что вертикальная компонента вектора скорости $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ -дрейфа приводит к подъему F2-слоя на дневной стороне ионосферы и к опусканию на ночной, что отмечалось также в [Клименко, Намгаладзе, 1976; Мингалев, 1978]. В [Liu et al., 2017] с помощью численной модели термосферы и ионосферы в переменных Эйлера TIEGCM (Thermosphere-Ionosphere Electrodynamics General Circulation Model) исследована конфигурация языка ионизации при различных параметрах ММП в разные моменты мирового времени. В [Klimentko et al., 2019] с помощью Глобальной самосогласованной модели термосферы, ионосферы, протоносферы (ГСМ ТИП) проведено исследование структуры языка ионизации в период геомагнитной бури 16–18 марта 2015 г. (буря святого Патрика). Заметим, что рассмотренные выше работы [Deng, Ridley, 2006; Liu et al., 2017; Klimentko et al., 2019 и др.] проведены для условий равноденствия.

Между тем эффекты несовпадения полюсов наиболее отчетливо проявляются для зимних условий [Колесник, Голиков, 1982, 1984; Golikov et al., 2020; Голиков и др., 2022]. В связи с этим представляется интересным исследовать влияние магнитосферной конвекции на крупномасштабную структуру высокоширотной ионосферы во время геомагнитной бури для условий зимнего солнцестояния ($\delta = -23^\circ$).

Целью настоящей работы является исследование влияния возмущенного электрического поля магнитосферной конвекции на крупномасштабную структуру ионосферы во время геомагнитной бури в зимний период с помощью нестационарной модели ионосферы, построенной с учетом несовпадения географического и геомагнитного полюсов. Для учета конвекции в настоящей работе используется эмпирическая модель электрического потенциала высокоширотной ионосферы Веймера [Weimer, 1996]. Модель Веймера основана на сферических гармонических функциях, коэффициенты которых получены по спутниковым данным, и позволяет получать распределение потенциала электрического поля в высокоширотной ионосфере в зависимости от параметров ММП.

1. МОДЕЛЬ ВЫСОКОШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ

Расчеты проведены по модели высокоширотной области F ионосферы, уравнения которой записаны в переменных Эйлера в сферической географической системе координат с полярной осью, совпадающей с осью вращения Земли [Голиков и др., 2012, 2016]. Концентрация электронов n_e , температуры электронов T_e и ионов T_i в интервале высот 120–1000 км определяются в результате численного решения системы нестационарных трехмерных уравнений, состоящей из уравнений непрерывности для ионов и теплопроводности для электронов и ионов. В рассматриваемой области высот можно принять условие квазинейтральности, т. е. $n_e \approx \sum n_i$. Скорости охлаждения электронного газа при взаимодействии с нейтральными частицами и ионами заданы согласно [Schunk, Nagy, 1978; David et al., 2011]. Температура и концентрация нейтральных компонент рассчитывались по модели термосферы NRLMSISE-00 [Picone et al., 2002]. Для расчета распределения средних энергий и потоков энергии высыпавшихся электронов использована модель авроральных высыпаний APM (Auroral Precipitation Model) [Vorobjev et al., 2013], а функция ионообразования высыпавшимися частицами рассчитывается по формуле, предложенной в [Fang et al., 2008]. Скорости фотоионизации при больших зенитных углах Солнца ($\chi > 75^\circ$) рассчитаны согласно [Charman, 1931]. Учет несовпадения географического и геомагнитного полюсов проводится следующим образом. Компоненты электрического поля и скорости магнитосферной конвекции, зоны высыпания энергичных частиц и нисходящего теплового потока определяются в сферической геомагнитной системе координат с последующим переводом в географическую систему. Приняты координаты северного геомагнитного полюса 78.5° N , 291° E

[Schunk, Nagy, 2009]. Геомагнитное поле задавалось в дипольном приближении, компоненты которого в сферической системе координат имеют вид

$$H_r = -2g_0 \left(\frac{R_E}{r} \right)^3 \cos \theta_m,$$

$$H_{\theta_m} = -g_0 \left(\frac{R_E}{r} \right)^3 \sin \theta_m,$$

$$H_\varphi = 0,$$

где r — радиус; θ_m — геомагнитная коширота; R_E — радиус Земли; $g_0 \sim 0.3$ Гс — напряженность геомагнитного поля, измеренного на экваторе при $r=R_E$.

Алгоритм решения системы моделирующих уравнений рассмотрен в [Голиков и др., 2012, 2016]. Для численного решения системы трехмерных дифференциальных уравнений используется метод суммарной аппроксимации [Samariskii, 2001], в котором решение трехмерных дифференциальных уравнений сводится к последовательному решению системы одномерных уравнений. Далее для одномерных уравнений используется конечно-разностная аппроксимация с последующим приведением к трехточечной схеме, которая решается методом прогонки. В качестве начального условия для решения уравнения непрерывности для ионов атомарного кислорода используется простой слой Чепмена, а электронная и ионная температуры приравниваются к температуре нейтрального газа. Расчеты проведены при следующих шагах: $\Delta r = 10$ км, $\Delta \theta = 2^\circ$, $\Delta \varphi = 10^\circ$, $\Delta t = 5$ мин.

Существенной проблемой при моделировании высокоширотной ионосферы является задание верхних граничных условий в области, где осуществляется обмен частицами с протоносферой и внутренней магнитосферой, особенно в случае возмущений. В настоящей работе за областью конвекции, где полагается, что силовые линии замкнуты, задан плазмосферный поток ионов O^+ $\Phi = \pm 10^8$ см⁻² с⁻¹ (плюс соответствует освещенному периоду, минус — затененному) согласно [Evans, 1974]. На высоких широтах в области конвекции принят нулевой поток $\Phi = 0$ в соответствии с результатами работы [Колесник, Голиков, 1981], в которой показано, что в данной области широт n_c на высоте F2-максимума слабо зависит от потока на верхней границе.

2. ВХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

В работе [Ермолаев и др., 2011] на основе данных OMNI [http://omniweb.gsfc.nasa.gov] для периода с 1976 по 2000 г. проведено статистическое исследование параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП) во время магнитных бурь. Показано, что внезапное начало умеренной геомагнитной бури (от -50 до -100 нТл) сопровождается резким понижением B_z -компоненты ММП до около -7 нТл в течение 1–2 ч на взрывной фазе бури. Затем на главной фазе наблюдается медленное монотонное падение B_z -компоненты ММП до -8 нТл. Индекс геомагнитной активности Dst при этом достигает около -80 нТл. Длительность главной фазы бури составляет около 6 ч. Вариации B_x - и B_y -компонент ММП, ско-

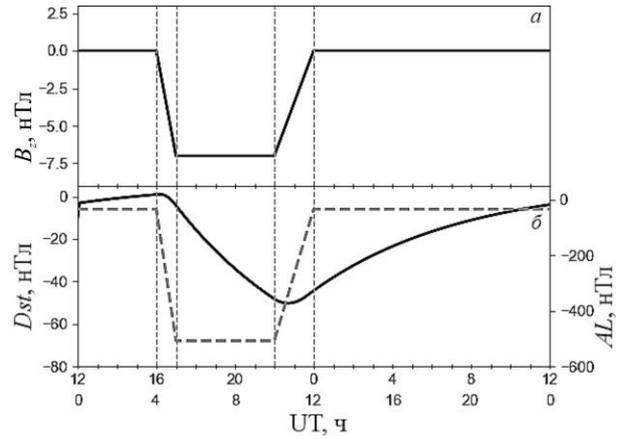


Рис. 1. Вариации B_z -компоненты ММП (а) и рассчитанные индексы геомагнитной активности Dst (сплошная линия) и AL (штриховая линия) (б) при внезапном начале бури в 16:00 UT и 04:00 UT

рости солнечного ветра V и его концентрации N во время умеренной бури можно принять малыми. На основе данных результатов в настоящей работе для описания возмущенного электрического поля в период умеренной геомагнитной бури были заданы следующие входные параметры модели Веймера: $V \approx 400$ км/с, $N \approx 10$ см⁻³, $B_x \approx 0$ нТл, $B_y \approx 0$ нТл. B_z -компонента ММП задана переменной (рис. 1, а). Рассматриваются два диаметрально противоположных сценария: 1 — с началом бури в 16 UT; 2 — с началом бури в 04 UT (см. рис. 1), поскольку несовпадение геомагнитного и географического полюсов приводит к контролю мировым временем крупномасштабной структуры высокоширотной ионосферы (UT-контроль) [Watkins, 1978; Sojka et al., 1979; Колесник, Голиков, 1982; Голиков и др., 2016]. Модель высыпаний заряженных частиц АРМ РГИА в качестве входных параметров использует индексы геомагнитной активности Dst и AL , рассчитанные по заданным параметрам ММП на основе следующих выражений [Burton et al., 1975; Murayama et al., 1980; Murayama, 1982]:

$$Dst = Dst_0 + b(P)^{1/2} - c,$$

$$AL = -60(B_s + 0.5)(V / 400)^2,$$

где

$$\frac{dDst_0}{dt} = F(E) - aDst_0;$$

$$F(E) = \begin{cases} 0, & E_y < 0.5 \text{ мВ/м}; \\ d(E_y - 0.5), & E_y \geq 0.5 \text{ мВ/м}; \end{cases}$$

$$B_s = \begin{cases} 0, & B_z \geq 0; \\ -B_z, & B_z < 0. \end{cases}$$

Здесь $E_y = VB_z \cdot 10^{-3}$ [мВ м⁻¹], $P = nV^2 \cdot 10^{-2}$ [эВ см⁻³], $a = 3.6 \cdot 10^{-5}$ [с⁻¹], $b = 0.2\gamma$ [(эВ см⁻³)^{-1/2}], $c = 20\gamma$, $d = -1.5 \cdot 10^{-3}\gamma$ [(мВ м⁻¹)⁻¹ с⁻¹].

Результаты расчетов Dst - и AL -индексов показаны на рис. 1, б. В спокойных условиях ($B_z = 0$) Dst принимает значения около 0 нТл, $AL \approx -34$ нТл. В возмущенный период ($B_z = -7$ нТл) значения Dst и AL дости-

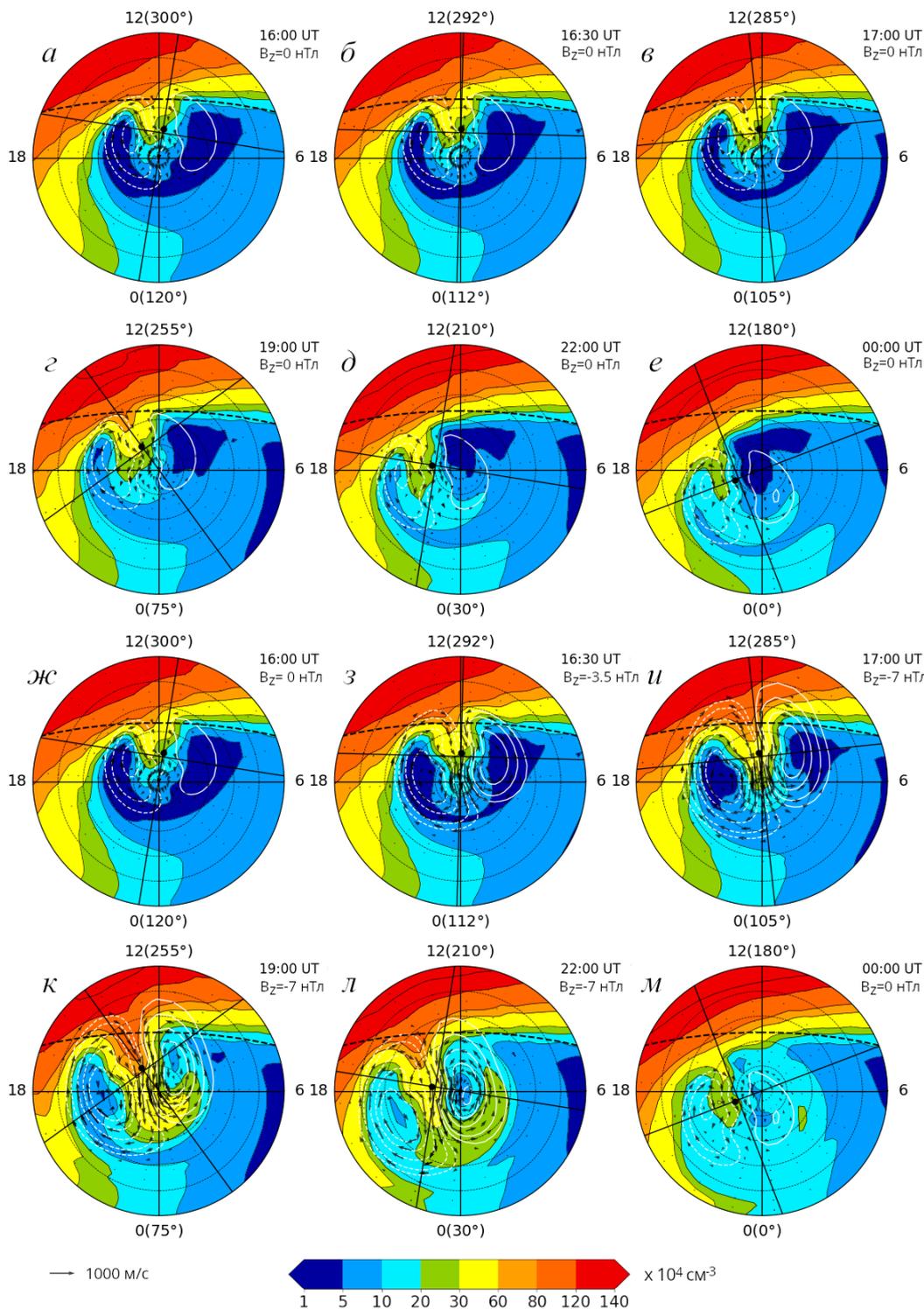


Рис. 2. Пространственно-временные распределения концентрации электронов на высоте F2-максимума $n_m F2$ в разные моменты мирового времени в спокойных ($B_z=0$, а–е) и возмущенных ($B_z \neq 0$, ж–м) условиях без учета высыпаний заряженных частиц для бури с началом в 16:00 UT

гают приблизительно -50 нТл и -500 нТл соответственно.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлены пространственно-временные распределения концентрации электронов на высоте F2-максимума $n_m F2$ в разные моменты мирового времени (UT) в спокойных (а–е) и возмущенных

(ж–м) условиях. Чтобы сделать эффект конвекции более наглядным, высыпания заряженных частиц не учитывались. Концентрические окружности соответствуют географическим широтам Северного полушария, проведенным через 10° . Нижняя граница соответствует 40° N. Цифры у внешнего круга — местное время, рядом в скобках приведена географическая долгота. Как видно на рисунке, на освещенной стороне находится Западное полушарие. Штриховая

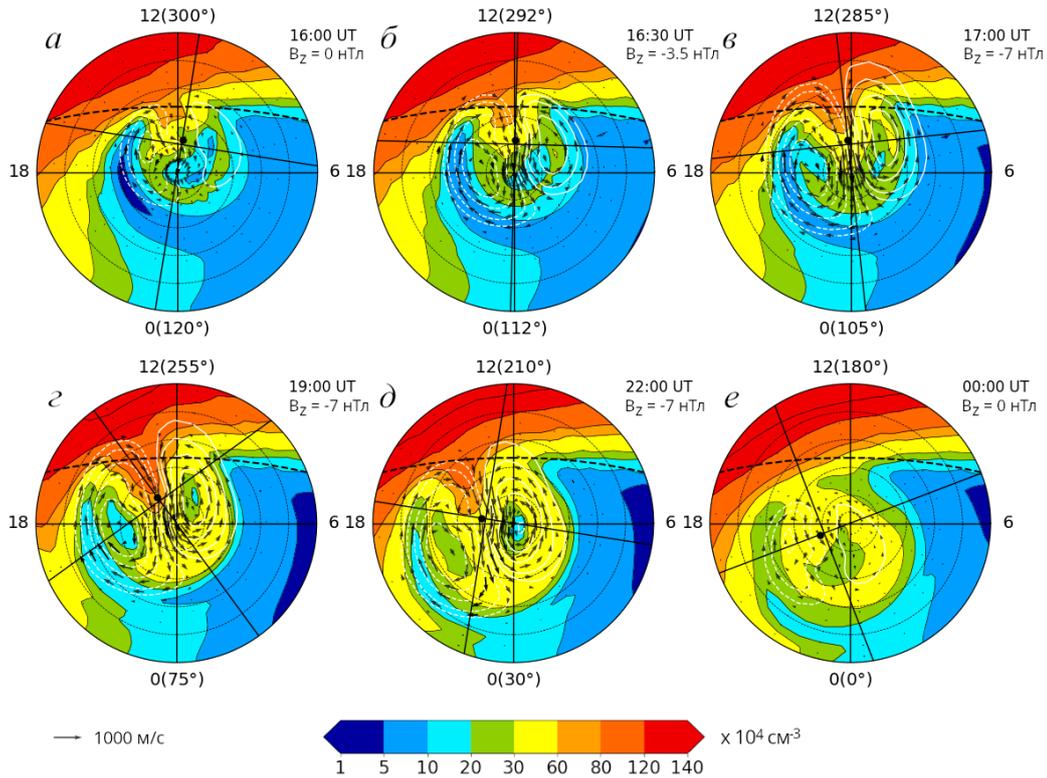


Рис. 3. То же, что на рис. 2, но с учетом выпадений заряженных частиц

линия (верхняя) — положение терминатора при зенитном угле $\chi=90^\circ$. Точка пересечения двух взаимно перпендикулярных линий — геомагнитный полюс, который отстоит от географического на 11.5° . Стрелками на этом рисунке, а также на рис. 3–9 изображены векторы скоростей дрейфа ионосферной плазмы, обусловленного электрическим полем магнитосферной конвекции (чем длиннее стрелка, тем больше скорость). Белыми изолиниями показаны значения потенциала электрического поля, рассчитанные по модели Веймера. Рассмотрим результаты численных расчетов для спокойных условий ($B_z=0$) (см. рис. 2, а–е). В этом случае структура конвекции состоит из двух ячеек в утреннем и вечернем секторах (см. рис. 2, а). По конфигурациям изолиний потенциала электрического поля и скоростей дрейфа электронов и ионов (стрелки) видно, что в 16:00 UT область конвекции частично заходит на освещенную зону выше терминатора, что приводит к антисолнечному выносу плазмы из дневной ионосферы на ночную сторону и формированию языка ионизации. Затем в интервале от 16:00 до 00:00 UT наблюдается постепенное смещение языка ионизации в ночном направлении вследствие вращения Земли вокруг своей оси и несовпадения географического и геомагнитного полюсов.

На рис. 2, жс–л показаны результаты численных расчетов для возмущенных условий. B_z -компонента ММП задана согласно сценарию 1 (см. рис. 1). Видно, что в начальный момент 16:00 UT электрическое поле конвекции соответствует спокойным условиям ($B_z=0$) (см. рис. 2, жс). Затем в интервале от 16:00 до 17:00 UT вследствие понижения B_z -компоненты

ММП до -7 нТл наблюдается усиление конвекции и увеличение области ее действия, что хорошо видно по изолиниям потенциала электрического поля (см. рис. 2, з, и). Это приводит к увеличению площади перекрытия области конвекции с освещенной ионосферой в 17:00 UT (см. рис. 2, и) и, как следствие, к более сильному выносу плазмы из области дневной ионизации на ночную сторону антисолнечным потоком и последующему удлинению языка ионизации в направлении день–ночь в 19:00 UT (см. рис. 2, к). Усиленная конвекция вызывает повышение $n_m F2$ в ночной высокоширотной области ионосферы до значений более $3 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ (см. рис. 2, к, л). В вечернем и утреннем секторах в областях конвекции, направленной к Солнцу, наблюдается вынос плазмы к полудню (см. рис. 2, к, л). После 22 UT конвекция ослабевает, однако на ночной стороне в 00:00 UT в высоких широтах $n_m F2$ выше, чем в спокойных условиях, за счет накопленной остаточной ионизации на главной фазе бури, что видно из сравнения рис. 2, е и м. Таким образом, сравнение результатов численных расчетов для спокойных и возмущенных условий показывает, что во время умеренной геомагнитной бури в субавроральных и высоких широтах наблюдаются положительные возмущения, обусловленные усилением антисолнечной конвекции и увеличением области ее действия.

На рис. 3 представлены результаты численных расчетов с учетом выпадений заряженных частиц по модели APM PGIA [Vorobjev et al., 2013]. Рассчитанные скорости корпускулярной ионизации представлены на рис. 4. В этом случае высокоширотная ионосфера дополнительно поддерживается иониза-

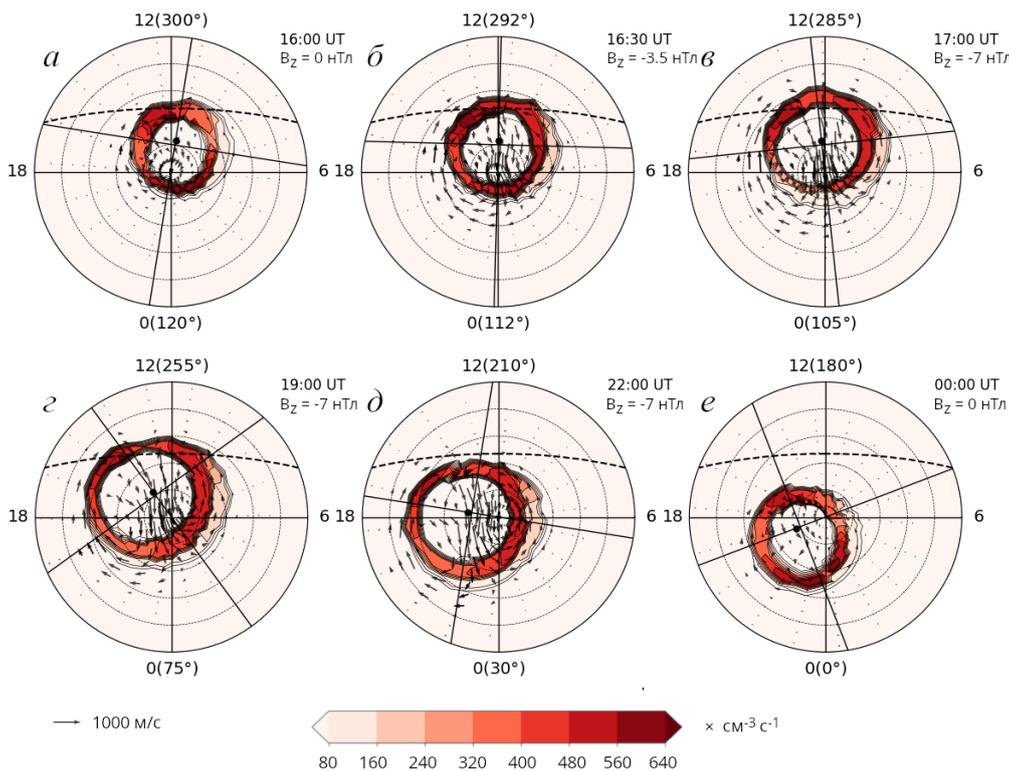


Рис. 4. Пространственно-временные распределения скорости корпускулярной ионизации q_k , рассчитанные на основе модели APM PGIA [Vorobjev et al., 2013] на высоте 200 км (авроральный овал)

цией вторгающимися заряженными частицами в авроральном овале. В спокойных условиях в 16:00 UT в полярной области ($\Phi_m \geq 80^\circ$) формируется область низких значений $n_m F2$ — полярная полость (см. рис. 3, а), окруженная ионизацией в авроральном овале. В широтном ходе в вечернем секторе в области «полной тени» [Колесник, Голиков, 1982] наблюдается глубокий провал концентрации — главный ионосферный провал (рис. 3, а). Полярная стенка ГИП формируется за счет совместного действия корпускулярной ионизации и магнитосферной конвекции. После начала бури в 16:30 UT возмущенное электрическое поле конвекции приводит к исчезновению полярной полости в результате увеличения потоков ионизированных частиц с дневной стороны в данную область (см. рис. 3, б, в). В 19:00 UT глубина ГИП уменьшается, а его положение смещается в южном направлении на $\sim 5 \div 10^\circ$ (см. рис. 3, д). Концентрация n_e в области языка ионизации увеличивается. К 00:00 UT B_z -компонента ММП падает до 0 нТл, а площадь области конвекции уменьшается и становится такой же, как в спокойном состоянии (см. рис. 3, е). В то же время за областью конвекции и высыпаний сохраняется остаточная дневная ионизация.

Теперь рассмотрим реакцию крупномасштабной структуры высокоширотной ионосферы на магнитную бурю с началом в 04:00 UT. Эта картина диаметрально противоположна картине во время магнитной бури с началом в 16:00 UT. На рис. 5 представлены результаты численных расчетов для спокойных и возмущенных условий с учетом высыпаний заряженных частиц. В этом случае на освещенной стороне оказывается Восточное полушарие. Как

видно, в 04:00 UT геомагнитный полюс и вместе с ним области конвекции и высыпаний находятся полностью на ночной стороне. Вследствие этого наблюдается отрыв от дневной ионосферы языка ионизации, концентрация в котором поддерживается корпускулярной ионизацией и магнитосферной конвекцией (рис. 5, а). На геомагнитных широтах выше 80° формируется полярная полость с $n_m F2 \leq 10^4 \text{ см}^{-3}$. В широтном ходе на дневной стороне в интервале $70\text{--}80^\circ \text{ N}$ наблюдается глубокий провал $n_m F2$ — дневной провал (см. рис. 5, а–е). Формирование дневного провала зимой связано с явлением «полной тени» [Колесник, Голиков, 1984].

В возмущенных условиях усиление магнитосферной конвекции приводит к расширению оторвавшегося языка ионизации и к сглаживанию авроральных пиков $n_m F2$ (см. рис. 5, ж–м). В 07:00 UT конвекция перекрывает дневной провал и существенно повышает $n_m F2$ по сравнению с ее значениями в спокойных условиях (см. рис. 5, к, л). К 12:00 UT скорости конвекции падают и ее область уменьшается. Однако из сравнения рис. 5, м, е видно, что на ночной стороне сохраняется остаточная дневная ионизация.

Таким образом, в период умеренной магнитной бури влияние магнитосферной конвекции, приводящее к изменению форм и размеров основных крупномасштабных структурных образований ионосферы, определяется временем начала геомагнитной бури вследствие несовпадения географического и геомагнитного полюсов.

Эффект бури наиболее выражен, если она начинается в 16:00 UT. В этом случае возмущенное электрическое поле магнитосферной конвекции сильнее

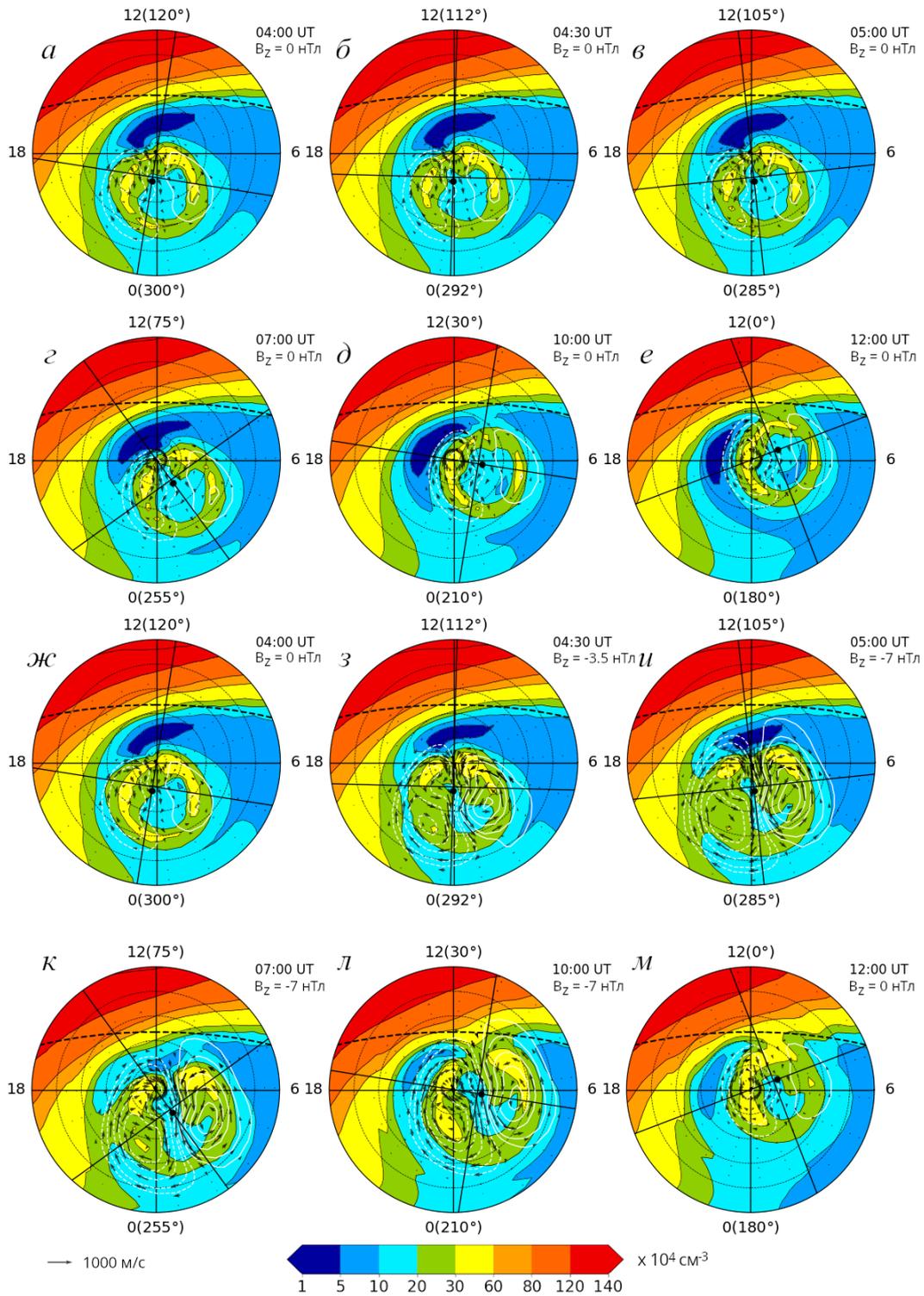


Рис. 5. Пространственно-временные распределения концентрации электронов на высоте F2-максимума $n_m F2$ в разные моменты мирового времени в спокойных ($B_z=0$, а–е) и возмущенных ($B_z \neq 0$, ж–м) условиях с учетом высыпаний заряженных частиц для магнитной бури с началом в 04:00 UT

выносит плазму из дневной ионосферы на ночную сторону, чем в спокойных условиях. Подобный эффект должен возникать и в Южном полушарии, где расхождение между географическим и геомагнитным полюсами еще больше. Заметим, что на состояние ночной зимней ионосферы в области замкнутых силовых линий влияет поток ионов из сопряженной летней ионосферы Южного полушария. Однако диффузионный

перенос между сопряженными ионосферами через плазму характеризуется инерционным свойством и формируется в течение ~8–10 ч [Кринберг, Тащилин, 1984].

Как было показано выше, магнитосферная конвекция является одним из основных механизмов горизонтального переноса плазмы в области высоких и субавроральных широт. Из-за особенностей конфигура-

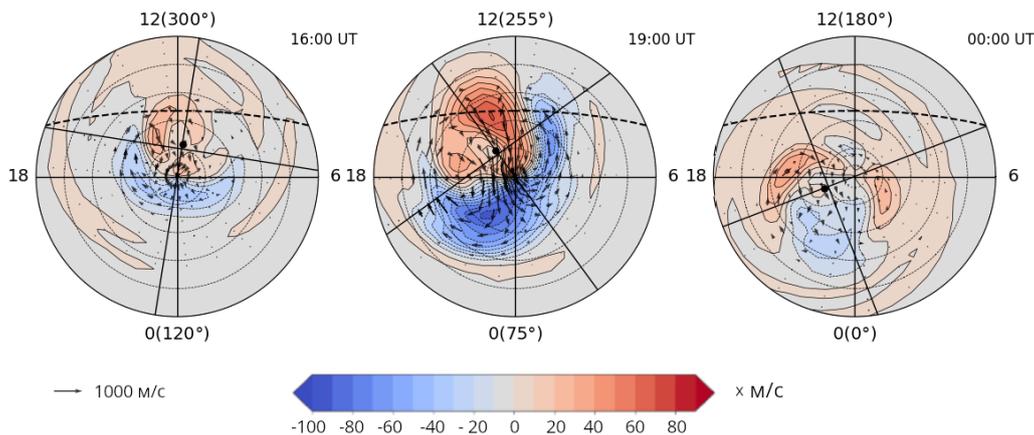


Рис. 6. Пространственно-временные распределения вертикальной компоненты скорости $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ -дрейфа u_{TE} на высоте 300 км в разные моменты мирового времени

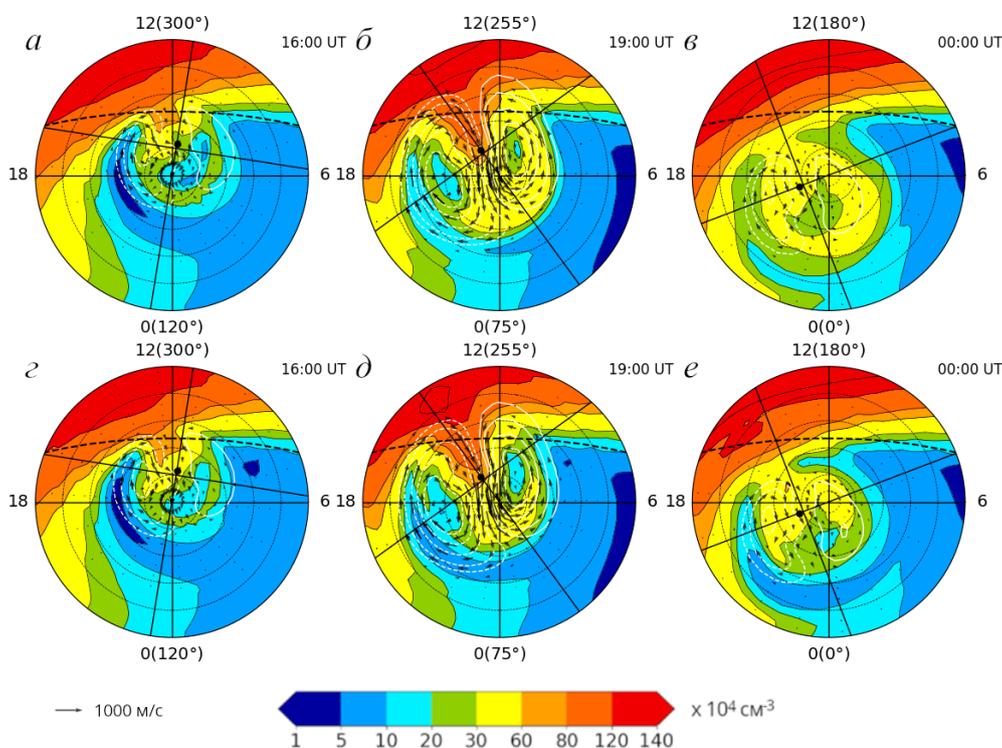


Рис. 7. Пространственно-временные распределения электронной концентрации в максимуме F2-слоя $n_m F2$ без учета (a–в) и с учетом (г–е) вертикальной компоненты $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ -дрейфа u_{TE} в разные моменты мирового времени

ции силовых линий магнитного поля Земли электрическое поле конвекции может также приводить к дрейфу плазмы вверх и вниз, наряду с движением плазмы вдоль силовых линий за счет диффузии и нейтрального ветра [Клименко, Намгаладзе, 1976; Мингалев, 1978; Deng, Ridley, 2006; Schunk, Nagy, 2009; Liu et al., 2017]. На рис. 6 показаны пространственно-временные распределения скорости вертикального $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ -дрейфа

$$u_{TE} = \frac{E_\phi}{H} \cos I,$$

где H — напряженность магнитного поля; I — наклонение геомагнитного поля; E_ϕ — зональная компонента электрического поля конвекции [Колес-

ник, Голиков, 1982], рассчитанные для условий с началом бури в 16:00 UT. В 16:00 UT, в спокойных условиях, на дневной стороне u_{TE} направлена вверх ($\sim +20$ м/с), а на ночной — вниз (~ -20 м/с). В 19:00 UT, в возмущенных условиях, u_{TE} существенно возрастает и достигает около ± 80 м/с. При сравнении распределений u_{TE} для 16:00 и 00:00 UT видно, что u_{TE} зависит от UT вследствие несовпадения географического и геомагнитного полюсов. Так, на распределении для 16:00 UT на ночной стороне u_{TE} направлена вниз в интервале от 08:00 до 14:00 LT, тогда как на распределении для 00:00 UT — в интервале от 20:00 до 01:00 LT.

На рис. 7, 8 показаны пространственно-временные распределения концентрации $n_m F2$ и высоты макси-

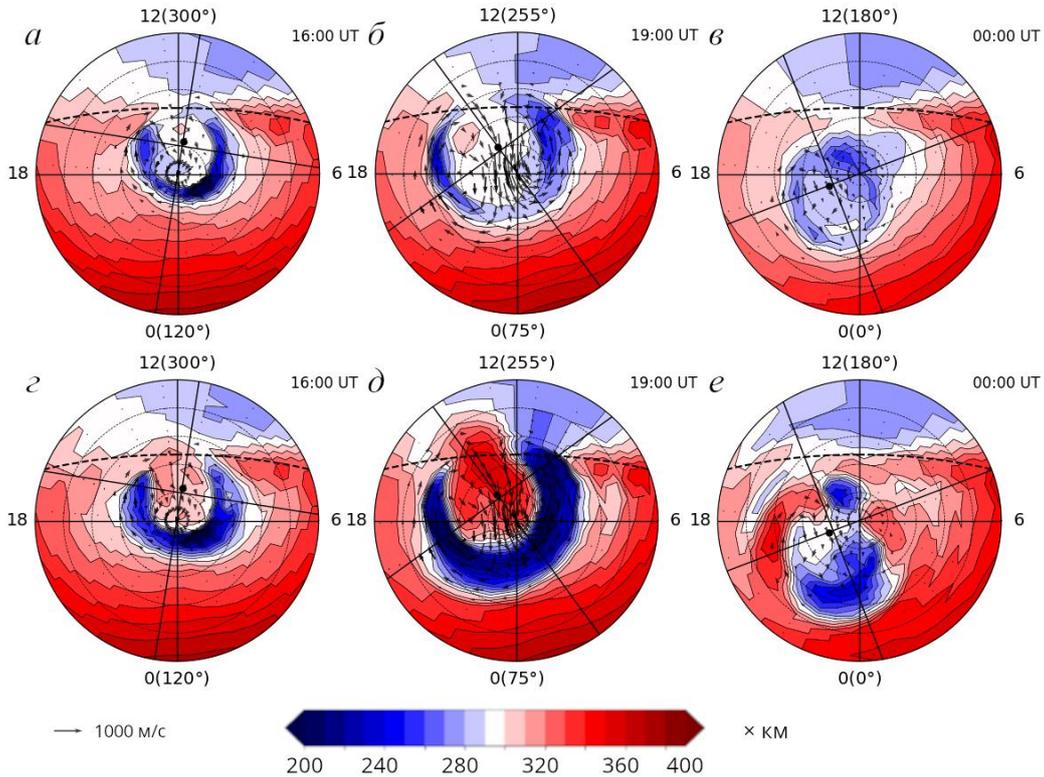


Рис. 8. Пространственно-временные распределения высоты максимума F2-области h_mF2 без учета (а–в) и с учетом (г–е) вертикальной компоненты $E \times B$ -дрейфа u_{TE} в разные моменты мирового времени

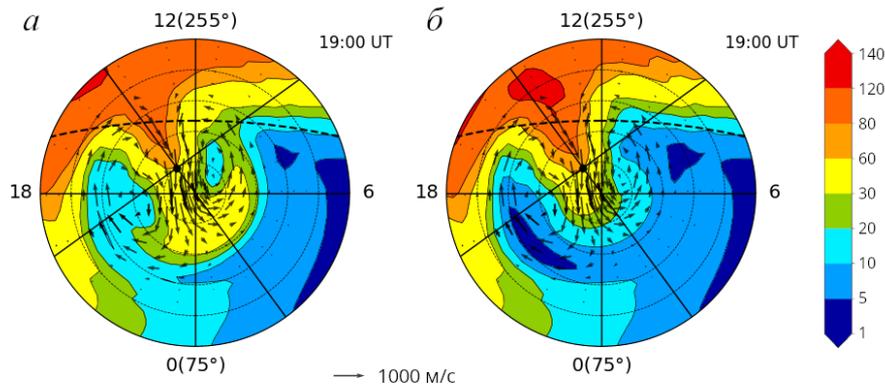


Рис. 9. Пространственно-временные распределения концентрации электронов n_e (в 10 см^{-3}) на высоте 360 км без учета (а) и с учетом (б) u_{TE}

мама F2-слоя h_mF2 без учета и с учетом u_{TE} , рассчитанные для бури с началом в 16:00 UT. Сравнение рис. 7, а–в и г–е позволяет оценить влияние вертикального электромагнитного дрейфа. Видно, что в 16:00 UT, в спокойных условиях, результаты численных расчетов различаются незначительно (рис. 7, а, г). Однако в 19:00 UT, после начала бури, воздействие u_{TE} приводит к значительному изменению высоты h_mF2 (рис. 8, д). На дневной стороне в послеполуденном секторе наблюдается подъем слоя F2 до ~ 360 км, а на ночной стороне — опускание до ~ 220 км (см. рис. 8, д). На ночной стороне воздействие u_{TE} приводит к общему понижению n_mF2 в субавторальной и высокоширотной ионосфере (см. рис. 7, д, е). На дневной стороне наблюдается по-

вышение n_mF2 в послеполуденном секторе (рис. 7, д). В 00:00 UT на геомагнитных широтах выше $\sim 80^\circ$ формируется полярная полость с $n_mF2 \approx 10^5 \text{ см}^{-3}$, а h_mF2 уменьшается на 40 км по сравнению со спокойными условиями (с 300 до 260 км) (см. рис. 7, е, 8, е). Это указывает на связь формирования полярной полости с направленной вниз u_{TE} , что согласуется с предположением, выдвинутым в работе [Tashchilin, Romanova, 2002].

На рис. 9 и 10 показаны пространственно-временное распределение концентрации электронов на высоте 360 км и высотный профиль n_e в 19:00 UT для дневных и ночных условий с учетом и без учета u_{TE} . Видно, что при учете u_{TE} на дневной стороне в послеполуденном секторе выше терминатора наблюда-

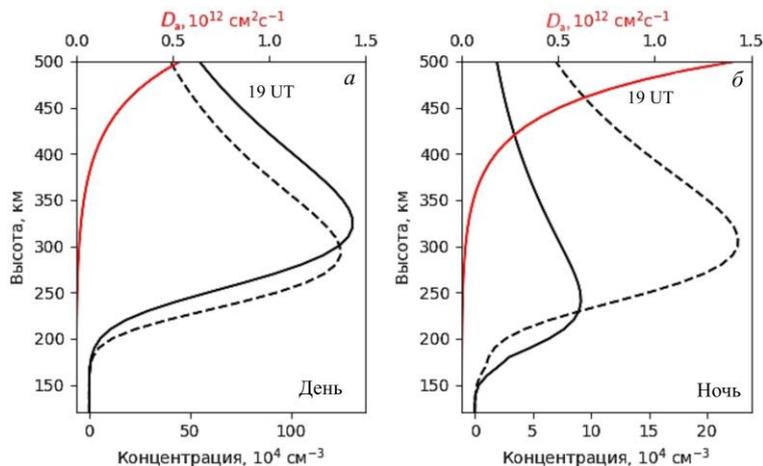


Рис. 10. Высотные профили концентрации электронов n_e (черная линия) и коэффициента амбиполярной диффузии D_a (красная линия) в 19:00 UT для дневных (54° N , 280° E) и ночных условий (70° N , 60° E) без учета (штрихи) и с учетом (сплошная линия) u_E

ется повышение n_e вследствие подъема максимума F2-слоя в область, где скорость рекомбинации ниже (см. рис. 9, б, 10, а). Повышению концентрации препятствует рост диффузии D_a на больших высотах, куда поднимается плазма со скоростью u_E (см. рис. 10, а). На ночной стороне наблюдается падение n_e , обусловленное опусканием слоя в область с высокой плотностью нейтральных частиц и, соответственно, с большей скоростью рекомбинации (см. рис. 9, б, 10, б). Подобные изменения $h_m\text{F2}$ и n_e в области возмущенной магнитосферной конвекции наблюдались также по измерениям на радаре некогерентного рассеяния в Poker Flat и по глобальным картам полного электронного содержания (ПЭС) GPS во время геомагнитной бури 24–25 октября 2011 г. [Zou et al., 2013].

Таким образом, вертикальная компонента скорости $\mathbf{E} \times \mathbf{V}$ -дрейфа оказывает существенное влияние на крупномасштабную структуру ионосферы, поэтому ее учет является необходимым при моделировании субавроральной и высокоширотной ионосферы в периоды геомагнитных возмущений. Заметим, что эффект, вызываемый u_E , будет зависеть от сезона, мирового времени и типа конвекции. Для изучения этого вопроса требуются дополнительные исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе численных расчетов по нестационарной модели ионосферы в переменных Эйлера исследовано влияние магнитосферной конвекции на крупномасштабную структуру ионосферы во время умеренной геомагнитной бури для зимних условий ($\delta = -23^\circ$). Результаты исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Возмущение электрического поля магнитосферной конвекции в период умеренной геомагнитной бури приводит к изменению форм и размеров основных структурных образований ионосферы, таких как полярная полость, язык ионизации, главный ионосферный провал.

2. В зимнее время наблюдается зависимость эффекта геомагнитной бури от времени начала воз-

мущения (UT-контроль) вследствие несовпадения географического и геомагнитного полюсов. Эффект наиболее выражен в случае бури с началом в 16:00 UT, когда возмущенное электрическое поле магнитосферной конвекции выносит плазму из дневной ионосферы на ночную сторону.

3. В возмущенные периоды существенное влияние на крупномасштабную структуру ионосферы оказывает вертикальная компонента электромагнитного дрейфа, которая приводит к понижению концентрации электронов на ночной стороне и повышению на дневной стороне вследствие изменения высоты максимума слоя.

Работа выполнена в рамках государственного задания (номер госрегистрации № 122011700182-1).

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. DOI: [10.12737/19424](https://doi.org/10.12737/19424) / Golikov I.A., Gololobov A.Yu., Popov V.I. Modelling the electron temperature distribution in F2 region of high-latitude ionosphere for winter solstice. *Solar-Terrestrial Physics*. 2016, vol. 2, iss. 4, pp. 70–80. DOI: [10.12737/24269](https://doi.org/10.12737/24269).

Голиков И.А., Гололобов А.Ю., Макаров Г.А., Баишев Д.Г. Определение зоны повышения температуры электронов в субавроральной ионосфере в глобальном масштабе во время магнитных бурь. *Геомагнетизм и аэрномия*. 2022, т. 62, №. 1, с. 106–118. DOI: [10.31857/S0016794022010084](https://doi.org/10.31857/S0016794022010084).

Данилов А.Д. Реакция области F на геомагнитные возмущения (обзор). *Гелиогеофизические исследования*. 2013, № 5, с. 1–33.

Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г., Николаева Н.С., Ермолаев М.В. Статистическое исследование влияния межпланетных условий на геомагнитные бури. 2. Вариации параметров. *Космические исследования*. 2011, т. 49, № 1, с. 24–37.

- Жеребцов Г.А., Мизун Ю.Г., Мингалев В.С. *Физические процессы в полярной ионосфере*. М.: Наука, 1988, 232 с.
- Клименко В.В., Намгаладзе А.А. Эффекты зональных электрических полей в дневной зимней среднеширотной ионосфере. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1976, т. 16, с. 1117–1119.
- Клименко М.В., Клименко В.В., Бессараб Ф.С. и др. Влияние геомагнитных бурь 26–30 сентября 2011 года на ионосферу и распространение радиоволн КВ-диапазона. I-ионосферные эффекты. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2015, т. 55, № 6, с. 769–789.
- Колесник А.Г., Голиков И.А. Исследование роли различных механизмов в формировании F2 ионосферы на двухмерной модели. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1981, т. 21, № 4, с. 612–616.
- Колесник А.Г., Голиков И.А. Трехмерная модель высокоширотной области F с учетом несовпадения географических и геомагнитных координат. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1982, т. 22, № 3, с. 435–439.
- Колесник А.Г., Голиков И.А. Явление «полной тени» в верхней атмосфере Земли. *Доклады АН СССР*. 1984, т. 279, № 4, с. 832–834.
- Кринберг И.А., Ташилин А.В. *Ионосфера и плазмаосфера*. М.: Наука, 1984. 190 с.
- Ларина Т.Н., Глебова Г.М. Исследование вариаций электронной концентрации в F-слое полярной ионосферы, обусловленных сменой знака B_y -компоненты межпланетного магнитного поля. *Инженерный вестник Дона*. 2019, № 1, 11 с. URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_120_Larina_N.pdf_5a3560990a.pdf (дата обращения 10 января 2025 г.).
- Мизун Ю.Г. *Полярная ионосфера*. Л.: Наука, 1980, 216 с.
- Мингалев В.С. Влияние электрических полей на полярную ионосферу. *Полярная ионосфера и магнитосферно-ионосферные связи*. Апатиты: КФ АН СССР, 1978, с. 43–48.
- Ратовский К.Г., Клименко М.В., Клименко В.В. и др. Эффекты последствий геомагнитных бурь: Статистический анализ и теоретическое объяснение. *Солнечно-земная физика*. 2018, т. 4, № 4, с. 32–42. DOI: [10.12737/szf44201804](https://doi.org/10.12737/szf44201804) // Ratovsky K.G., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Chirik N.V., Korenkova N.A., Kotova D.S. After-effects of geomagnetic storms: statistical analysis and theoretical explanation. *Solar-Terrestrial Physics*. 2018, vol. 4, iss. 4, pp. 26–32. DOI: [10.12737/stp-44201804](https://doi.org/10.12737/stp-44201804).
- Уваров В.М., Барашков П.Д. Типы распределения электрических полей и соответствующие им типы конвекции в полярной ионосфере. Модель. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1989, т. 29, № 4, с. 621–628.
- Уваров В.М., Лукьянова Р.Ю. Моделирование высокоширотной ионосферы с учетом влияния параметров межпланетной среды. *Гелиогеофизические исследования*. 2014, № 7, с. 108–118.
- Burton R.K., McPherron R.L., Russel C.T. An empirical relationship between interplanetary conditions and *Dst*. *J. Geophys. Res.* 1975, vol. 80, no. 31, pp. 4204–4214. DOI: [10.1029/JA080i031p04204](https://doi.org/10.1029/JA080i031p04204).
- Chapman S. The absorption and dissociative of ionizing effect of monochromatic radiation in an atmosphere on a rotation. *Earth. Proc. Phys. Soc.* 1931, vol. 43, pp. 483–501. DOI: [10.1088/0959-5309/43/5/302](https://doi.org/10.1088/0959-5309/43/5/302).
- David M., Schunk R., Sojka J. The effect of downward electron heat flow and electron cooling processes in the high-latitude ionosphere. *J. Atmos. Solar-Terrestrial Physics*. 2011, vol. 73, pp. 2399–2409. DOI: [10.1016/j.jastp.2011.08.009](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2011.08.009).
- Deng Y., Ridley A.J. Role of vertical ion convection in the high-latitude ionospheric plasma distribution. *J. Geophys. Res.* 2006, vol. 111, A09314. DOI: [10.1029/2006JA011637](https://doi.org/10.1029/2006JA011637).
- Evans J.V. *Millstone Hill Thomson scatter results for 1969*. Technical Report 513. Massachusetts Institute of Technology, 1974, 140 p.
- Fang X., Randall C., Lummerzheim D., et al. Electron impact ionization: A new parameterization for 100 eV to 1 MeV electrons. *J. Geophys. Res.* 2008, vol. 113, iss. 9. DOI: [10.1029/2008JA013384](https://doi.org/10.1029/2008JA013384).
- Golikov I., Gololobov A., Baishev D. Universal time control of the parameters of the electron temperature enhancement zone in the winter subauroral ionosphere. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2020, vol. 211, 105458. DOI: [10.1016/j.jastp.2020.105458](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105458).
- Heppner J.P., Maynard N.C. Empirical high-latitude electric field models. *J. Geophys. Res.* 1987, vol. 92, pp. 4467–4489. DOI: [10.1029/JA092iA05p04467](https://doi.org/10.1029/JA092iA05p04467).
- Klimenko M.V., Zakharenkova I.E., Klimenko V.V., et al. Simulation and observation of the polar tongue of ionization at different heights during the 2015 St. Patrick's day storms. *Space Weather*. 2019, vol. 17, pp. 1073–1089. DOI: [10.1029/2018SW002143](https://doi.org/10.1029/2018SW002143).
- Liu J., Wang W., Burns A., et al. A TIEGCM numerical study of the source and evolution of ionospheric F-region tongues of ionization: Universal time and interplanetary magnetic field dependence. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2017, vol. 156, pp. 87–96. DOI: [10.1016/j.jastp.2017.03.005](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.03.005).
- Lukianova R.Yu., Uvarov V.M., Coisson P. High-latitude F region large-scale ionospheric irregularities under different solar wind and zenith angle conditions. *Adv. Space. Res.* 2016, vol. 59, pp. 557–570. DOI: [10.1016/j.asr.2016.10.010](https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.10.010).
- Murayama T. Coupling function between solar wind parameters and geomagnetic indices. *Rev. Geophys. Space Phys.* 1982, vol. 20, no. 3, pp. 623–629. DOI: [10.1029/RG020i003p00623](https://doi.org/10.1029/RG020i003p00623).
- Murayama T., Aoki T., Nakai H., Hakamada K. Empirical formula to relate the auroral electrojet intensity with interplanetary parameters. *Planet Space. Sci.* 1980, vol. 28, pp. 803–813. DOI: [10.1016/0032-0633\(80\)90078-1](https://doi.org/10.1016/0032-0633(80)90078-1).
- 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, vol. 107, pp. 1501–1516. DOI: [10.1029/2002JA009430](https://doi.org/10.1029/2002JA009430).
- Prössl G.W. *Ionospheric F-Region Storms. Handbook of Atmospheric Electrodynamics II*. Eds. H. Volland. Boca Raton: CRC Press, 1995, pp. 195–248.
- Samarskii A. *The Theory of Difference Schemes*. New York: Marcel Dekker, 2001, 761 p.
- Schunk R., Nagy A. Electron temperature in the F regions of the ionosphere: theory and observations. *Rev. Geophys.* 1978, vol. 16, pp. 355–399. DOI: [10.1029/RG016i003p00355](https://doi.org/10.1029/RG016i003p00355).
- Schunk R.W., Nagy A. *Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry*. New York: Cambridge University Press, 2009, 628 p.
- Sojka J.J., Raitt W.J., Schunk R.W. Effect of displaced geomagnetic and geographic poles on high-latitude plasma convection and ionospheric depletions. *J. Geophys. Res.* 1979, vol. 85, no. A10, pp. 5943–5951. DOI: [10.1029/JA084iA10p05943](https://doi.org/10.1029/JA084iA10p05943).
- Tashchilin A.V., Romanova E.B. Numerical modeling the high-latitude ionosphere. *Proc. of the COSPAR Colloquium on Solar-Terrestrial Magnetic Activity and Space Environment (STMASE)*. Beijing, China. Pergamon, 2002, vol. 14, pp. 315–325.
- Tashchilin A.V., Romanova E.B. Influence of magnetospheric inputs definition on modeling of ionospheric storms. *Physics of Auroral Phenomena, Proc. XXX Annual Seminar*. 2007, pp. 189–192.
- Uvarov V.M., Lukianova R.Yu. Numerical modeling of the polar F region ionosphere taking into account the solar wind conditions. *Adv. Space. Res.* 2015, vol. 56, no. 11, pp. 2563–2574. DOI: [10.1016/j.asr.2015.10.004](https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.10.004).
- Vorobjev V.G., Yagodkina O.I., Katkalov Yu.V. Auroral Precipitation Model and its application to ionospheric and magnetospheric studies. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2013, vol. 102, pp. 157–171. DOI: [10.1016/j.jastp.2013.05.007](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2013.05.007).

- Watkins B.J. A numerical computer investigation of the polar F-region ionosphere. *Planet. Space Sci.* 1978, vol. 26, pp. 559–569. DOI: [10.1016/0032-0633\(78\)90048-X](https://doi.org/10.1016/0032-0633(78)90048-X).
- Weimer D.R. A flexible, IMG dependent model of high-latitude electric potentials having “space weather” applications. *Geophys. Res. Lett.* 1996, vol. 23, no. 18, pp. 2549–2552.
- Zou S., Ridley A., Moldwin M.B., et al. Multi-instrument observations of SED during 24–25 October 2011 storm: Implications for SED formation processes. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2013, vol. 118, pp. 7798–7809. DOI: [10.1002/2013JA018860](https://doi.org/10.1002/2013JA018860).
- URL: <http://omniweb.gsfc.nasa.gov> (дата обращения 10 января 2025 г.).

Как цитировать эту статью:

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. 11, № 1, с. 100–111. DOI: [10.12737/szf-112202509](https://doi.org/10.12737/szf-112202509).