

---

---

# ФИЗИЧЕСКИЕ НАУКИ

---

УДК 537.632/636

DOI 10.25587/2222-5404-2024-21-1-45-57

## Численное моделирование влияния ММП на крупномасштабную структуру ионосферы с учетом несовпадения полюсов

А. Ю. Гололобов<sup>1,2</sup> ✉, И. А. Голиков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт космических исследований и астрономии им. Ю.Г. Шафера СО РАН, г. Якутск, Россия

<sup>2</sup>Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия

✉ gololobov@ikfia.ysn.ru

**Аннотация.** Межпланетное магнитное поле (ММП), вмороженное в плазму солнечного ветра, определяет уровень геомагнитной активности и существенно влияет на крупномасштабную структуру высокоширотной ионосферы. Вариации компонент ММП приводят к нестационарности электрического поля магнитосферной конвекции, вызывая изменения пространственно-временного распределения заряженных частиц в ионосфере. Ситуацию усложняет факт несовпадения географического и геомагнитного полюсов, который приводит к контролю параметров высокоширотной ионосферы мировым временем (УТ-контроль). Эффект несовпадения полюсов наиболее ярко выражен в зимнее время. Поэтому в настоящей работе в рамках нестационарной математической модели области F ионосферы в переменных Эйлера с учетом несовпадения географического и геомагнитного полюсов исследовано влияние компонент межпланетного магнитного поля на крупномасштабную структуру высокоширотной ионосферы в зимний период. Для этого использована модель высокоширотных электрических потенциалов Веймера, зависящая от ММП. В результате численного моделирования показано, что компоненты ММП влияют на форму, размер и пространственно-временное расположение основных структурных особенностей высокоширотной ионосферы в зависимости от мирового времени. Получен эффект раздвоения «языка ионизации», который требует экспериментального подтверждения. Полученные результаты демонстрируют, что разработанная нестационарная трехмерная модель ионосферы в переменных Эйлера может быть применена в исследовании ионосферных возмущений, в том числе возмущений ионосферы, связанных с изменениями компонент ММП.

**Ключевые слова:** высокоширотная ионосфера, межпланетное магнитное поле, несовпадение полюсов, магнитосферная конвекция, моделирование ионосферы, нестационарная модель, переменные Эйлера, язык ионизации, полярная полость, контроль мировым временем.

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

**Для цитирования:** Гололобов А. Ю., Голиков И. А. Численное моделирование влияния ММП на крупномасштабную структуру ионосферы с учетом несовпадения полюсов. Вестник СВФУ. 2024, Т. 21, №1. С. 45–57. DOI: 10.25587/2222-5404-2024-21-1-45-57

# Numerical modelling of the IMF influence on the large-scale structure of the ionosphere, including the poles displacement

A. Yu. Gololobov<sup>1,2</sup>✉, I. A. Golikov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ShICRA SB RAS), Yakutsk, Russia

<sup>2</sup>M.K.Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

✉ Gololobov@ikfia.ysn.ru

**Abstract.** The interplanetary magnetic field (IMF), frozen into the solar wind plasma, determines the level of geomagnetic activity and significantly affects the large-scale structure of the high-latitude ionosphere. Variations in the IMF components lead to non-stationarity of the magnetospheric convection electric field, causing changes in the spatio-temporal distribution of charged particles in the ionosphere. The situation is complicated by the fact that the geographic and geomagnetic poles do not coincide, which leads to universal time control (UT control) of the parameters of the high-latitude ionosphere. The effect of the poles displacement is most manifest in winter. Therefore, in this work, within the framework of a nonstationary mathematical model of the F-region of the ionosphere in Euler variables, taking into account the displacement between the geographic and geomagnetic poles, we study the influence of the interplanetary magnetic field components on the large-scale structure of the high-latitude ionosphere in winter. For this, the Weimer model of high-latitude electric potentials, which depends on the IMF, was used. As a result, of numerical modelling, it is shown that the IMF components affect the shape, size and spatio-temporal location of the main structural features of the high-latitude ionosphere depending on universal time. The obtained effect of ionisation tongue separation requires experimental confirmation. The obtained results demonstrate that the developed non-stationary three-dimensional model of the ionosphere in Euler variables can be applied to the study of ionospheric disturbances, including ionospheric disturbances associated with changes in the IMF components.

**Keywords:** high-latitude ionosphere, interplanetary magnetic field, poles displacement, magnetospheric convection, ionospheric modelling, non-stationary model, Euler variables, ionisation tongue, polar hole, universal time control.

*This research was done in the framework of the state assignment (register number 122011700182-1).*

**For citation:** Gololobov A. Yu., Golikov I. A. Numerical modelling of the IMF influence on the large-scale structure of the ionosphere, including the poles displacement. Vestnik of NEFU. 2024, Vol. 21, No. 1. Pp. 45–57. DOI: 10.25587/2222-5404-2024-21-1-45-57

## Введение

Межпланетное магнитное поле (ММП) играет важную роль во взаимодействии солнечного ветра с магнитосферой Земли. По данным спутниковых измерений, средняя величина ММП составляет  $5 \div 6$  нТл [1, 2] и более в периоды геомагнитной бури. В отличие от внутренних источников магнитного поля Земли, испытывающих медленные вариации, влияние ММП приводит к резким, внезапным изменениям напряженности магнитного поля Земли и является главной причиной возникновения магнитных бурь и суббурь. Флуктуации и внезапные изменения значений компонент ММП будут приводить к нестационарности электрического поля магнитосферной конвекции, являющейся одним из основных факторов, определяющих крупномасштабную структуру высокоширотной ионосферы. Поэтому изменения ММП необходимо учитывать в численном моделировании ионосферы.

Исследование влияния межпланетного магнитного поля на крупномасштабную структуру высокоширотной ионосферы с помощью численных моделей проведено в работах [3–9]. Первые работы по влиянию ММП проводились на моделях, построенных на формализме Лагранжа в предположении совпадения географического и геомагнитного полюсов. Так, в [4] влияние ММП изучено путем сравнения результатов численных расчетов с моделями конвекции А и Б Хеппнера, соответствующих разным типам конвекции. В [5, 6] использована аналитическая модель электрического поля конвекции [10]. Показано, что изменения ориентации ММП ведут к перестройке крупномасштабной структуры высокоширотной ионосферы. Позже в [7] проведено исследование влияния ММП на крупномасштабную структуру высокоширотной ионосферы с учетом несовпадения географического и геомагнитного полюсов. В [8] рассмотрена реакция высокоширотной ионосферы на скачкообразное изменение знака  $B_y$ -компоненты ММП. Показано, что смена знака  $B_y$ -компоненты сопровождается расслоением «языка ионизации» и образованием крупномасштабных пятен ионизации. В [9] на численной модели термосферы и ионосферы в переменных Эйлера TIEGCM (Thermosphere-Ionosphere Electrodynamic General Circulation Model) с использованием модели электрического поля Веймера [11] изучена реакция конфигурации «языка ионизации» на резкие изменения  $B_y$ - и  $B_z$ -компонент ММП с учетом несовпадения географического и геомагнитного полюсов для условий равноденствия ( $\delta=0^\circ$ ). Установлено, что изменение  $B_y$ -компоненты ММП приводит к смещению области «языка ионизации» в утренне-вечернем направлении. При  $B_z > 0$  «язык ионизации» уменьшается в размере либо не формируется вовсе. Выявлена зависимость «языка ионизации» от мирового времени. Так, наибольшей концентрации «язык ионизации» достигает в интервале 16-20 UT. В работах [12, 13] показано, что эффекты несовпадения полюсов наиболее хорошо проявляются для зимних условий ( $\delta=-23^\circ$ ). Отметим, что использованные в этих работах выражения [14], аппроксимирующие модель «А» Хеппнера [15], описывают распределение электрического поля магнитосферной конвекции для условий умеренной геомагнитной активности ( $K_p \approx 1 \div 3$ ) и не зависят от компонент ММП. В связи с этим представляет интерес исследование влияния ММП на крупномасштабную структуру высокоширотной ионосферы для зимних условий с учетом несовпадения географического и геомагнитного полюсов.

Целью настоящей работы является исследование с помощью нестационарной модели ионосферы, построенной на основе эйлерового подхода с учетом несовпадения географического и геомагнитного полюсов, влияния компонент ММП на крупномасштабную структуру ионосферы в зависимости от мирового времени в зимний период. Для учета ММП в настоящей работе используется модель высокоширотных электрических потенциалов Веймера [11]. Модель основана на сферических гармонических функциях, коэффициенты которых получены на основе спутниковых измерений, и позволяет получать распределение потенциала электрического поля в высокоширотной ионосфере. Отметим, что в работе [16], где использована данная модель, показана зависимость ионного состава плазмосферы и структуры плазмопаузы от типа магнитосферной конвекции.

### Материалы и методы исследования

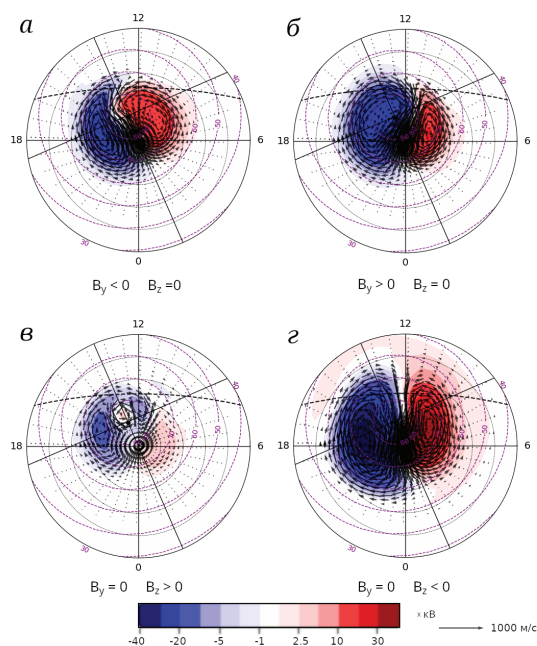
Расчеты проведены на модели высокоширотной области F ионосферы, уравнения которой записаны в переменных Эйлера в сферической географической системе координат с полярной осью, совпадающей с осью вращения Земли [17]. Здесь приведено ее краткое описание. Концентрация электронов ( $n_e$ ), температуры электронов ( $T_e$ ) и ионов ( $T_i$ ) определяется в результате численного решения системы нестационарных трехмерных уравнений, состоящей из уравнений непрерывности для ионов, теплопроводности для электронов и ионов, в интервале высот 120–1000 км. 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 [18, 19]. Температура и концентрация нейтральных компонент рассчитывались по модели термосферы NRLEMSIS-00 [20]. Для расчета распределения средних энергий и потоков энергии выпадающих электронов использована модель авроральных выпадений APM (Auroral Precipitation Model) [21], а функция ионообразования выпадающими частицами рассчитывается по формуле, предложенной в [22]. Скорости фотоионизации при больших зенитных углах Солнца ( $\chi > 75^\circ$ ) рассчитаны согласно [23]. Учет несовпадения географического и геомагнитного полюсов проводится следующим образом. Компоненты электрического поля и скорости магнитосферной конвекции, зоны выпадения энергичных частиц и нисходящего теплового потока определяются в сферической геомагнитной системе координат с последующим переводом в географическую систему. Координаты северного геомагнитного полюса приняты равными  $78.5^\circ$  с. ш.,  $291^\circ$  в. д. [24].

Алгоритм решения системы моделирующих уравнений рассмотрен в [17, 25]. Для численного решения системы трехмерных дифференциальных уравнений используется метод суммарной аппроксимации [26], 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 пространственных шагах:  $\Delta r = 10$  км,  $\Delta \theta = 2^\circ$ ,  $\Delta \phi = 10^\circ$ . А по временному шагу поступили следующим образом. Так, с целью изучения вычислительной устойчивости численного решения моделирующих уравнений шаги варьировались в пределах от 1 до 1800 секунд ( $\Delta t = 1, 10, 30, 60, 300, 1800$  сек). Эксперименты показали вычислительную устойчивость данной модели ионосферы при всех шагах интегрирования по времени, что позволяет использовать ее для исследования нестационарных процессов, протекающих в ионосферной плазме.

### Результаты и обсуждение

На рис. 1 показаны распределения потенциала электрического поля магнитосферной конвекции, полученные с помощью модели Веймера [11], и рассчитанные векторы скоростей электрического дрейфа плазмы (стрелки) при разных ориентациях  $B_y$ - и  $B_z$ -компонент ММП. В расчетах скорость солнечного ветра принята равной 400 км/с. Концентрические окружности соответствуют географическим широтам северного полушария, проведенным через  $10^\circ$ . Цифры у внешнего круга – местное время. Штриховая линия (верхняя) – положение терминатора при зенитном угле  $\chi = 90^\circ$ . Точка пересечения двух взаимно перпендикулярных линий – геомагнитный полюс, который отстоит от географического на  $11.5^\circ$ . Штриховые окружности вокруг геомагнитного полюса – геомагнитные широты. Стрелками даны скорости электронов и ионов, обусловленные электрическим полем магнитосферного происхождения. Рассмотрим результаты расчетов при  $B_z = 0$  (рис. 1а, б). Видно, что при  $B_z = 0$  картина (или тип) конвекции принимает двухъячеечную (двухвихревую) структуру. Вечерне-утренняя асимметрия ячеек контролируется  $B_y$ -компонентой. Так, при  $B_y < 0$  (рис. 1а) антисолнечная конвекция в полярной области отклонена к востоку от антисолнечного направления, а при  $B_y > 0$  (рис. 1б) – к западу. При  $B_z > 0$  картина конвекции усложняется и принимает четырехъячеечную структуру (рис. 1в). При этом область конвекции не меняется в размере и ограничена пространственно  $\sim 60^\circ$  геомагнитной широты (рис. 1в). При  $B_z < 0$  происходят существенное увеличение области конвекции и повышение скоростей дрейфа заряженных частиц (рис. 1г). Картина конвекции принимает двухъячеечную



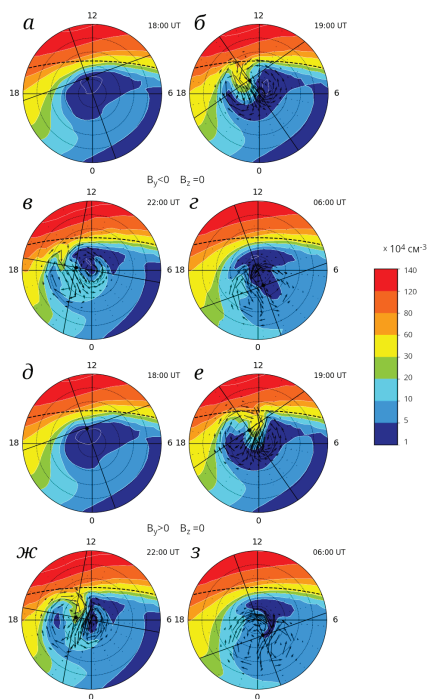
**Рис. 1.** Распределение потенциала электрического поля магнитосферной конвекции по модели Веймера в северном полушарии и рассчитанные скорости дрейфа плазмы (стрелки) при разных ориентациях  $B_y$ - и  $B_z$ -компонент ММП для условий зимнего солнцестояния ( $\delta = -23^\circ$ ) в 18 UT

**Fig. 1.** Distribution of the electric field potential of magnetospheric convection according to the Weimer model in the northern hemisphere and calculated plasma drift velocities (arrows) at different orientations of the  $B_y$ - and  $B_z$ -components of the IMF for winter solstice conditions ( $\delta = -23^\circ$ ) at 18 UT

структуру с охватом геомагнитных широт ниже  $60^\circ$ , что видно по пространственно-временному распределению векторов скоростей дрейфа плазмы. Таким образом, картина магнитосферной конвекции, полученная с помощью модели Веймера, существенно зависит от  $B_z$ -компоненты ММП, а также характеризуется вечерне-утренней асимметрией, связанной с компонентой  $B_y$ .

В настоящей работе вначале рассмотрена реакция высокоширотной ионосферы на включение магнитосферной конвекции с помощью нестационарной модели высокоширотной ионосферы, описанной выше. Сначала расчеты проводились без учета магнитосферной конвекции, затем в 18 UT включается магнитосферное электрическое поле по модели Веймера. Расчеты проведены для условий зимнего солнцестояния ( $\delta = -23^\circ$ ) и среднего уровня солнечной активности ( $F10.7=150$ ). В целях выявления роли конвекции вначале корпускулярная ионизация выпадающими частицами не учитывается, что вполне допустимо при невозмущенных условиях. Здесь представлены результаты расчетов, выполненных при шаге по времени  $\Delta t = 300$  сек.

Рассмотрим четыре варианта расчетов: 1 –  $B_y < 0$ ,  $B_z = 0$ ; 2 –  $B_y > 0$ ,  $B_z = 0$ ; 3 –  $B_y = 0$ ,  $B_z > 0$ ; 4 –  $B_y = 0$ ,  $B_z < 0$  с соответствующими типами конвекции, представленными на рис. 1. Сравнение вариантов расчета 1 и 2 позволит оценить роль  $B_y$ -компоненты, а варианты 3 и 4 – роль  $B_z$ -компоненты ММП в пространственно-временном распределении электронной концентрации в ионосфере. На рис. 2 показана эволюция распределения электронной концентрации  $n_e$  в разные моменты UT для типа конвекции, полученной при  $B_y < 0$  и  $B_z = 0$  и  $B_y > 0$  и  $B_z = 0$ . Пространственно-временное распределение  $n_e$  в 18 UT на рис. 2а соответствует крупномасштабной структуре высокоширотной ионосферы в



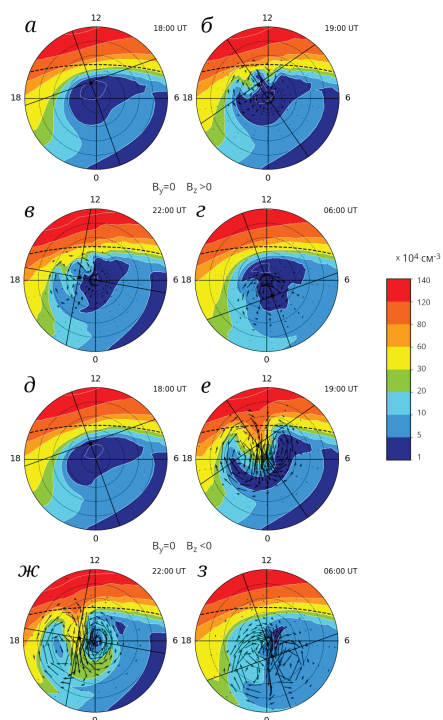
**Рис. 2.** Эволюция распределения концентрации электронов на высоте 300 км для условий зимнего солнцестояния ( $\delta = -23^\circ$ ) при включении электрического поля магнитосферной конвекции по модели Веймера с компонентами ММП  $B_y < 0, B_z = 0$  (а, б, в, г) и  $B_y > 0, B_z = 0$  (д, е, ж, з) в 18 UT

**Fig. 2.** Evolution of electron concentration distribution at an altitude of 300 km for winter solstice conditions ( $\delta = -23^\circ$ ) at inclusion of the electric field of magnetospheric convection according to the Weimer model with MMP components  $B_y < 0, B_z = 0$  (а, б, в, г) and  $B_y > 0, B_z = 0$  (д, е, ж, з) at 18 UT

отсутствии магнитосферной конвекции. Видно, что в полярной области формируется зона низких значений концентрации электронов – «полярная полость» ( $n_e \approx 10^4 \text{ cm}^{-3}$ ). Включение магнитосферной конвекции ведет к заносу дневной ионизации на ночную сторону антисолнечным потоком плазмы и, как следствие, к образованию «языка ионизации» (рис. 2б, в). Отметим, что для задаваемого типа конвекции происходит дрейф плазмы с послеполуденной части дневной ионосферы на ночную сторону. В 06 UT происходит отрыв «языка ионизации» от дневной ионосферы (рис. 2г). Результаты численных расчетов для второго варианта ( $B_y > 0, B_z = 0$ ) представлены на рис. 2д, е, ж, з. В данном случае антисолнечная конвекция в полярной области отклонена к западу от антисолнечного направления. Это приводит к дрейфу плазмы на ночную сторону с предполуденной части дневной ионосферы (рис. 2е, ж). В 06 UT происходит отрыв «языка ионизации» от дневной ионосферы (рис. 2з), как и при  $B_y < 0, B_z = 0$  (рис. 2г).

Рассмотрим случаи при  $B_z \neq 0$ . На рис. 3 показаны результаты численных расчетов для третьего ( $B_y = 0, B_z > 0$ ) и четвертого ( $B_y = 0, B_z < 0$ ) вариантов расчетов соответственно. В третьем варианте происходит уменьшение области конвекции и скоростей дрейфа заряженных частиц (рис. 3а, б, в, г). Отметим, что данный тип конвекции имеет четырехъячеичную структуру (рис. 1б), две из которых в 18 UT частично оказываются на освещенной стороне ионосферы. Это приводит к формированию «языка ионизации», состоящего из двух частей в предполуденном и послеполуденном секторах, т. к. на границе ячеек, как видно на рис. 1в, векторы скорости дрейфа плазмы направлены к Солнцу, вследствие чего поток слабой ионизации «полярной полости» разделяет «язык



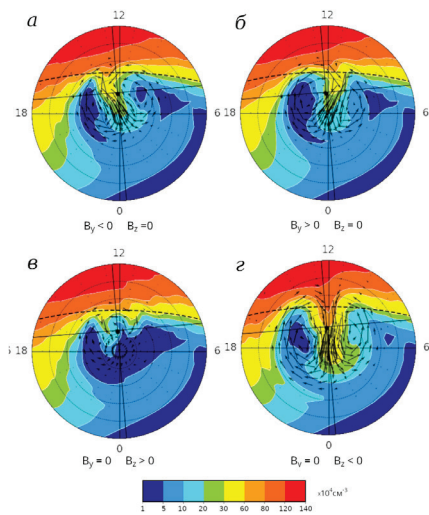


**Рис. 3.** То же, что и на рис. 2, но при  $B_y = 0, B_z > 0$  (а, б, в, г) и  $B_y = 0, B_z < 0$  (д, е, ж, з)

**Fig. 3.** The same as the fig. 2, but  $B_y = 0, B_z > 0$  (а, б, в, г) and  $B_y = 0, B_z < 0$  (д, е, ж, з)

ионизации» надвое (рис. 3б). Отметим, что полученный в результате моделирования эффект раздвоения «языка ионизации» требует экспериментального подтверждения. При этом «полярная полость» существует во все часы UT, а ее «глубина» ниже, чем в других вариантах расчетов (рис. 3б-г). На рис. 3е видно, что для четвертого типа конвекции скорости дрейфа плазмы выше, а ее область больше, чем в других вариантах. Это приводит к усилению заноса дневной ионизации на ночную сторону и формированию «языка ионизации», занимающей большую площадь, чем в третьем варианте расчета (рис. 3е, ж). В 06 UT в полярной области наблюдается повышение концентрации электронов на вечерней стороне в интервале местного времени  $\sim 12 - 00$  LT, обусловленное увеличением области конвекции и, как следствие, заносом остаточной дневной ионизации с вечернего сектора на высокие широты (рис. 3з).

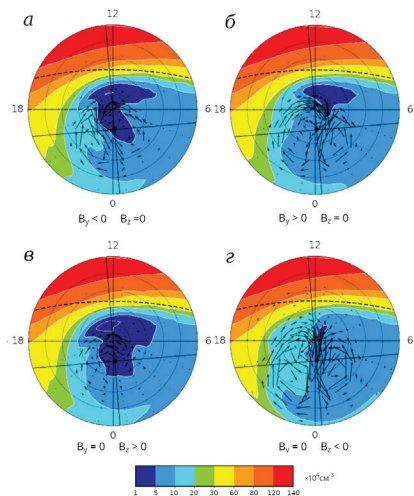
Эффекты контроля мировым временем (UT-контроля) в пространственно-временном распределении концентрации электронов, обусловленные несовпадением географического и геомагнитного полюсов, наиболее выражены в моменты 05 и 17 UT, когда в 05 UT геомагнитный полюс находится вблизи полуночного меридиана, а в 17 UT – вблизи полуденного, соответственно. На рис. 4 и 5 показаны результаты численных расчетов при задании разных типов стационарного электрического поля магнитосферной конвекции по модели Веймера (рис. 1) для условий зимнего солнцестояния в 05 и 17 UT. В 17 UT на ночную сторону антисолнечной конвекцией заносится дневная ионизация, которая формирует «язык ионизации» (рис. 4). Видно, что форма и площадь «языка ионизации» зависят от ориентации ММП. Так, площадь «языка ионизации» зависит от  $B_z$ -компоненты, а  $B_y$ -компонента определяет его отклонение от антисолнечного направления. При  $B_y < 0$  дневная ионизация заносится на ночную сторону с послеполуденного сектора, а при  $B_y > 0$  с предполуденного. При  $B_z > 0$ , как и на рис. 3б,



**Рис. 4.** Распределение концентрации электронов на высоте 300 км в 17 UT при разных ориентациях  $B_y$ - и  $B_z$ -компонент ММП

**Fig. 4.** Electron concentration distribution at an altitude of 300 km at 17 UT in different orientations  $B_y$ - and  $B_z$ - IMF component

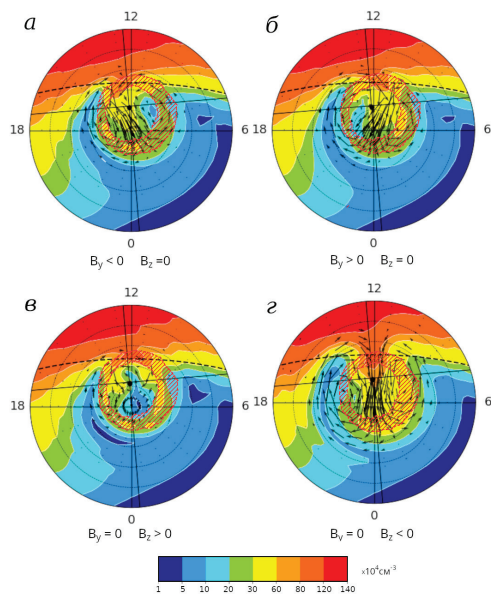
происходит разделение «языка ионизации» надвое (рис. 4б). При  $B_z < 0$  из-за усиления антисолнечной конвекции «язык ионизации» «перекрывает» «полярную полость» и занимает практически всю высокоширотную ионосферу (рис. 4г). В 05 UT область конвекции находится полностью на ночной стороне и, как следствие этого, занос дневной ионизации на ночную сторону не происходит (рис. 5). Это приводит к понижению концентрации полярной ионосферы (рис. 5а, б, в). Концентрация электронов в высокоширотной области при  $B_z < 0$  выше, чем в других вариантах расчета, поскольку из-за увеличения размера области конвекции происходит занос остаточной дневной ионизации с вечернего сектора на высокие широты (рис. 5г).



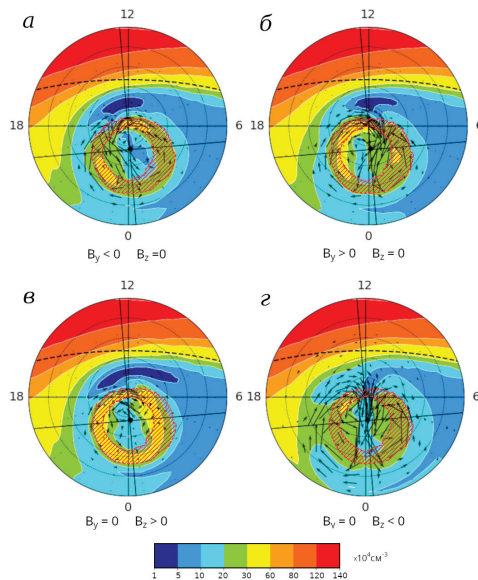
**Рис. 5.** То же, что и на рис. 4, но для 05 UT

**Fig. 5.** The same as the fig. 4, but for 05 UT





**Рис. 6.** Распределение концентрации электронов на высоте 300 км в 17 UT при разных ориентациях компонент ММП  $B_y$  и  $B_z$  с учетом высыпаний заряженных частиц  
**Fig. 6.** Electron concentration distribution at an altitude of 300 km at 17 UT in different orientations of the IMF components  $B_y$  and  $B_z$  taking into account the expulsions of charged particles



**Рис. 7.** То же, что и на рис. 6, но для 05 UT  
**Fig. 7.** The same as the fig. 6, but for 05 UT

Существенное влияние на крупномасштабную структуру высокоширотной ионосферы также оказывает высыпание заряженных частиц. На рис. 6 и 7 показаны результаты численных расчетов для тех же условий, что и на рис. 4 и 5, проведенных с учетом высыпаний заряженных частиц. Овал высыпаний заштрихован красными линиями.

В 17 UT, в отличие от расчетов без учета высыпаний, «язык ионизации» формируется за счет совместного действия конвекции и корпускулярной ионизации. Вследствие этого концентрация «языка ионизации» выше, чем на рис. 4. Учет высыпаний приводит к повышению концентрации «полярной полости» ( $n_e \approx 5 \cdot 10^4 \div 10^5 \text{ см}^{-3}$ ), местоположение которой зависит от ориентации  $B_y$ -компоненты ММП (рис. 6а, б). Так, она при  $B_y < 0$  проявляется на утренней стороне (рис. 6а), а при  $B_y > 0$  – на вечерней (рис. 6б). При  $B_z > 0$  «полярная полость» занимает большую площадь (рис. 6в). При  $B_z < 0$  из-за усиления антисолнечной конвекции «язык ионизации» «перекрывает» «полярную полость» и занимает практически всю высокоширотную ионосферу (рис. 6г). В субавроральных широтах на ночной стороне прослеживается главный ионосферный провал (ГИП) ( $n_e \approx 10^4 \div 5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ ), полярная стенка которого формируется за счет корпускулярной ионизации и магнитосферной конвекции. При  $B_z < 0$  из-за увеличения размера области конвекции ГИП смещается к экватору в среднем на  $7^\circ$ , что видно из сравнения рис. 6в и 6г. В 05 UT область конвекции находится полностью на ночной стороне и, как следствие этого, происходит отрыв «языка ионизации» от дневной ионосферы с образованием дневного провала между терминатором и областью конвекции, где  $n_e \approx 10^4 \text{ см}^{-3}$  (рис. 7а,б,в). При  $B_z < 0$  из-за увеличения размера области конвекции и усиления ее скорости дневной провал формируется только в дополуночном интервале времени  $\sim 6\text{--}12 \text{ LT}$ , а ее «глубина» выше, чем в вариантах расчета при  $B_z > 0$ , так как происходит занос остаточной среднеширотной и авроральной ионизации в полярную область (рис. 7г). Наибольшую протяженность во времени и «глубину» дневной провал имеет при  $B_z > 0$ . Для типов конвекции 1–3 в высокоширотной ионосфере формируется «полярная полость», где  $n_e \approx 10^5 \text{ см}^{-3}$  (рис. 7а, б, в). При этом, как и в 17 UT, ее положение определяется  $B_y$ -компонентой ММП. При  $B_y < 0$  она проявляется на утренней стороне, поскольку происходит занос авроральной ионизации на полярные широты с вечернего сектора (рис. 7а), а при  $B_y > 0$  – на вечерней стороне за счет заноса авроральной ионизации с утреннего сектора (рис. 7б). Наименьшую протяженность во времени «полярная полость» имеет при  $B_z < 0$  (рис. 7г).

### Заключение

Таким образом, численное моделирование с использованием модели электрических потенциалов Веймера показало: а) нестационарная трехмерная модель ионосферы в переменных Эйлера сохраняет вычислительную устойчивость при малых шагах интегрирования по времени вплоть до 1 секунды, что позволяет применить ее в исследовании ионосферных возмущений, в том числе возмущений ионосферы, связанных с изменениями компонентов ММП; б) основные особенности крупномасштабной структуры высокоширотной ионосферы, такие как «полярная полость», «язык ионизации», «главный ионосферный провал», испытывают в зимний период значительные изменения форм и размеров в зависимости от ориентаций компонент ММП и мирового времени; в) полученный эффект раздвоения «языка ионизации» требует экспериментального подтверждения.

### Л и т е р а т у р а

1. Брюнелли, Б. Е. Физика ионосферы / Б. Е. Брюнелли, А. А. Намгаладзе. – Москва : Наука, 1998. – 528 с. ISBN 5-02-000716-1.
2. Некоторые аспекты моделирования высокоширотной ионосферной конвекции по данным Cluster/EDI / М. Фёрстер, Я. И. Фельдштейн, Л. И. Громова [и др.]. // Геомагнетизм и аэрономия. – 2013. – Т. 53. № 1. – С. 91–101. doi: 10.7868/S0016794013010094.
3. Изменения в структуре F-слоя полярной ионосферы при смене знака  $Y$ -компоненты межпланетного магнитного поля. Эффект Свальгарда-Мансуров в ионосфере / Ю. И. Гальперин, А. Г. Зосимова, Т. Н. Ларина [и др.]. // Космические исследования. – 1980. – Т. 18, № 6. – С. 877–898.

4. Жеребцов, Г. А. Физические процессы в полярной ионосфере / Г. А. Жеребцов, Ю. Г. Мизун, В. С. Мингалев. – Москва : Наука, 1988.
5. Уваров, В. М. Моделирование высокоширотной ионосферы с учетом влияния параметров межпланетной среды / В. М. Уваров, Р. Ю. Лукьянова // Гелиогеофизические исследования. – 2014. – № 7. – С. 108–118.
6. Uvarov, V. M. (2015). Numerical modeling of the polar F region ionosphere taking into account the solar wind conditions. *Adv. Space. Res.* V. 56, I. 11. Pp. 2563–2574.
7. Lukianova, R. Yu. (2016). High-latitude F region large-scale ionospheric irregularities under different solar wind and zenith angle conditions. *Adv. Space. Res.* V. 59. Pp. 557–570.
8. Ларина, Т. Н. Исследование вариаций электронной концентрации в F-слое полярной ионосферы, обусловленных сменой знака Ву-компоненты межпланетного магнитного поля / Т. Н. Ларина, Г. М. Глебова // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 1.
9. Liu, J., Wang, W., Burns, A., Liu, L., & McInerney, J. (2017). A TIEGCM numerical study of the source and evolution of ionospheric F-region tongues of ionisation: Universal time and interplanetary magnetic field dependence. *Journal Of Atmospheric And Solar-Terrestrial Physics*, 156, 87-96. doi:10.1016/j.jastp.2017.03.005.
10. Уваров, В. М., Типы распределения электрических полей и соответствующие им типы конвекции в полярной ионосфере : Модель / В. М. Уваров, П. Д. Барашков // Геомагнетизм и аэрономия. – 1989. – Т. 29. – № 4. – С. 621–628.
11. Weimer, D. R. (1996). A flexible, IMG dependent model of high-latitude electric potentials having «space weather» applications. *Geophys. Res. Letters*. V. 23, N. 18. 1996. p. 2549-2552.
12. Колесник, А. Г. Трехмерная модель высокоширотной области F с учетом несовпадения географических и геомагнитных координат / А. Г. Колесник, И. А. Голиков // Геомагнетизм и аэрономия. – 1982. – Т. 22. – № 3. – С. 435–439.
13. Колесник, А. Г. Явление «полной тени» в верхней атмосфере Земли / А. Г. Колесник, И. А. Голиков // Доклады АН СССР. – 1984. – Т. 279. № 4. – С. 832–834.
14. Роль конвекции диффузии и потокообмена между ионосферой и магнитосферой в формировании основных структурных форм F-области полярной ионосферы / Н. К. Осипов, С. П. Чернышева, А. М. Можаяев, Т. Н. Ларина // Динамические процессы и структура полярной ионосферы. – Апатиты, 1980. – С. 11–21.
15. Heppner, J. R. (1977). Empirical model of high-latitude electric field. *J. Geophys. Res.* V. 82, N 7. Pp. 1115–1125.
16. Тащилин, А. В. Моделирование свойств плазмосферы при спокойных и возмущенных условиях / А. В. Тащилин, Е. Б. Романова // Геомагнетизм и аэрономия. – 2014. – Т. 54. – № 1. – С. 13–22.
17. Голиков, И. А. Моделирование распределения температуры электронов в области F2 высокоширотной ионосферы для условий зимнего солнцестояния / И. А. Голиков, А. Ю. Гололобов, В. И. Попов // Солнечно-земная физика. – 2016. – Т. 2. – № 4. – С. 54–62.
18. Schunk, R., Nagy A. (1978). Electron temperature in the F regions of the ionosphere: theory and observations. *Rev. Geophys.* V. 16. Pp. 355–399.
19. David, M., Schunk, R., Sojka J. (2011). The effect of downward electron heat flow and electron cooling processes in the high-latitude ionosphere. *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* V. 73. Pp. 2399–2409. doi:10.1016/j.jastp.2011.08.009.
20. Picone, J. M., Hedin, A. E., Drob, D. P., Aikin A. (2002). NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparison and scientific issues. *J. Geophys. Res.* V. 107. Pp. 1501–1516. doi:10.1029/2002JA009430.
21. Vorobyov, V., Yagodkina O., Katkalov Y. (2013). Auroral Precipitation Model and its application to ionospheric and magnetospheric studies *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* V. 102. Pp. 157–171. doi:10.1016/j.jastp.2013.05.007.
22. Fang, X., Randall, C., Lummerzheim, D., Solomon, S. (2008). Electron impact ionisation: A new parameterization for 100 eV to 1 MeV electrons. *J. Geophys. Res.* V. 113, A09311. doi:10.1029/2008JA013384.

23. Chapman, S. (1931). The absorption and dissociative of ionising effect of monochromatic radiation in an atmosphere on a rotating earth. *Proc. Phys. Soc.* V. 43. Pp. 483–501. doi:10.1088/0959-5309/43/5/302.
24. Schunk, R.W., Nagy A. (2009). *Ionospheres: physics, plasma physics, and chemistry*. N.Y. : Cambridge University Press, 640 p.
25. Голиков, И. А. Численное моделирование теплового режима высокоширотной ионосферы / И. А. Голиков, А. Ю. Гололобов, В. И. Попов // Вестник Северо-Восточного федерального университета. – 2012. – Т. 9. – № 3. – С. 22–28.
26. Samarskii, A. (2001). *The theory of difference schemes*. New York : Basel. Marcel.

## References

1. Brunelli, B.E. and Namgaladze, A.A. (1988). *Physics of ionosphere*. Moscow: Nauka, 528 p. (in Russ.)
2. Foerster, M. (2013). *Some aspects of modelling the high-latitude ionospheric convection from Cluster/Edi data*. *Geomagnetism and Aeronomy*, 53(1). pp. 91-101. doi: 10.7868/S0016794013010094.
3. Galperin, Yu.I. (1980). *Variations in the structure of the F-layer of the polar ionosphere at a change of the sign of the Y-component of the interplanetary magnetic field. The Svalgaard-Mansurov effect in the ionosphere*. *Space Research*, 18(6), pp. 877–898.
4. Zherebtsov, G.A. (1988). *Physical processes in the polar ionosphere*. Moscow: Nauka.
5. Uvarov, V. M. and Lukianova, R.Yu. (2014). *Modelling of the high-latitude ionosphere taking into account the influence of interplanetary medium parameters*. *Heliogeophysical Research*, 7, pp. 108–118.
6. Uvarov, V. M. (2015). *Numerical modeling of the polar F region ionosphere taking into account the solar wind conditions*. *Advances in Space Research*, 56(11), pp. 2563–2574.
7. Lukianova, R. Yu. (2016). *High-latitude F region large-scale ionospheric irregularities under different solar wind and zenith angle conditions*. *Advances in Space Research*, 59, pp. 557–570.
8. Larina, T. N. and Glebova, G.M. (2019) Investigation of variations of electron concentration in the F-layer of the polar ionosphere due to the change of sign of the by-component of the interplanetary magnetic field. *Engineering Journal of Don*, 1.
9. Liu, J., Wang, W., Burns, A., Liu, L., and McInerney, J. (2017). *A TIEGCM numerical study of the source and evolution of ionospheric F-region tongues of ionisation: Universal time and interplanetary magnetic field dependence*. *Journal Of Atmospheric And Solar-Terrestrial Physics*, 156, 87–96. doi:10.1016/j.jastp.2017.03.005.
10. Uvarov, V. M. and Barashkov, P.D. (1989). *Types of electric field distribution and the corresponding types of convection in the polar ionosphere. A model*. *Geomagnetism and Aeronomy*, 29(4), pp. 621–628.
11. Weimer, D. R. (1996). *A flexible, IMG dependent model of high-latitude electric potentials having "space weather" applications*. *Geophysical Research Letters*. 23(18), pp. 2549–2552.
12. Kolesnik, A. G. and Golikov, I. A. (1982). *A three-dimensional model of the high-latitude F-region with account for non-coincidence of the geographic and geomagnetic coordinates*. *Geomagnetism and Aeronomy*, 22(3), pp. 435–439.
13. Kolesnik, A.G. and Golikov, I.A. (1984). *A full shadow" phenomenon in the Earth's upper atmosphere*. *Reports of the Academy of Sciences of the USSR*, 279(4). pp. 832–834.
14. Osipov, N. K., Chernysheva, S. P., Mozhaev, A. M. and Larina, T. N. (1980). *The role of diffusion convection and flow exchange between the ionosphere and magnetosphere in the formation of the main structural forms of the F-region of the polar ionosphere*. *Dynamic processes and structure of the polar ionosphere*, Apatity, pp. 11-21.
15. Heppner, J. R. (1977). *Empirical model of high-latitude electric field*. *Journal of Geophysical Research*, 82(7), pp. 1115–1125.
16. Tashilin, A. V. (2014). *Modelling of the plasmasphere properties under calm and perturbed conditions*. *Geomagnetism and Aeronomy*, 54(1), pp. 13–22.
17. Golikov, I.A., Gololobov A.Yu. and Popov V.I. (2016). *Modeling the electron temperature distribution in F2 region of high-latitude ionosphere for winter solstice conditions*. *Solar-Terrestrial Physics*, 2(4), pp. 54–62.

18. Schunk, R., Nagy A. (1978). *Electron temperature in the F regions of the ionosphere: theory and observations*. Reviews of Geophysics, 16, pp. 355–399.
19. David, M., Schunk, R. W. and Sojka J. J. (2011). *The effect of downward electron heat flow and electron cooling processes in the high-latitude ionosphere*. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 73, pp. 2399–2409. doi:10.1016/j.jastp.2011.08.009.
20. Picone, J. M., Hedin, A. E., Drob, D. P., Aikin A. (2002). *NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparison and scientific issues*. Journal of Geophysical Research, 107, pp. 1501–1516. doi:10.1029/2002JA009430.
21. Vorobyov, V., Yagodkina O. and Katkalov Y. (2013). *Auroral Precipitation Model and its application to ionospheric and magnetospheric studies*. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 102, pp. 157–171. doi:10.1016/j.jastp.2013.05.007.
22. Fang, X., Randall, C., Lummerzheim, D. and Solomon, S. (2008). *Electron impact ionisation: A new parameterization for 100 eV to 1 MeV electrons*. Journal of Geophysical Research, 113, A09311. doi:10.1029/2008JA013384.
23. Chapman, S. (1931). *The absorption and dissociative of ionising effect of monochromatic radiation in an atmosphere on a rotating earth*. Proceedings of the Physical Society, 43, pp. 483–501. doi:10.1088/0959-5309/43/5/302.
24. Schunk, R.W. and Nagy, A. (2009). *Ionospheres: physics, plasma physics, and chemistry*. New York: Cambridge University Press, 640 p.
25. Golikov, I.A., Gololobov, A.Yu. and Popov V.I. (2012). *Numerical simulation of thermal regime of high-latitude ionosphere*. Vestnik of North-Eastern Federal University, 9(3), pp. 22–28.
26. Samarskii, A. (2001). *The theory of difference schemes*. New York: Basel. Marcel.

---

ГОЛОЛОБОВ Артем Юрьевич – к. ф.-м. н., с. н. с. лаборатории магнитосферно-ионосферных исследований, Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера СО РАН; доцент ФТИ СВФУ.

E-mail: Gololobov@ikfia.ysn.ru

GOLOLOBOV Artem Yurevich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher of Magnetospheric and Ionospheric Researches Laboratory, Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Associate Professor of IPT, M.K. Ammosov NEFU.

ГОЛИКОВ Иннокентий Алексеевич – д. ф.-м. н., г. н. с. лаборатории магнитосферно-ионосферных исследований, Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера СО РАН.

E-mail: gia2008n@mail.ru

GOLIKOV Innikenty Alexeevich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Chief Researcher of Magnetospheric and Ionospheric Researches Laboratory, Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.