
ФИЗИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 533.9

DOI 10.25587/2222-5404-2024-21-2-37-45

Исследование вычислительной устойчивости модели высокоширотной ионосферы

А. Ю. Гололобов ✉, И. А. Голиков

Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера СО РАН, г. Якутск, Россия

✉ gololobov@ikfia.ysn.ru

Аннотация. Ионосферная плазма в области высоких широт представляет собой сложную для описания среду вследствие зависимости ее параметров от гелиогеофизических условий. На ее крупномасштабную структуру влияют такие процессы, как магнитосферная конвекция, плазмосферные потоки частиц и тепла, а также выпадение энергичных частиц в области аврорального овала. Эти процессы являются нестационарными, и в периоды повышения геомагнитной активности их характеристики существенно изменяются. Поэтому моделирование высокоширотной ионосферы связано с разработкой модели, обладающей вычислительной устойчивостью численного решения при достаточно высоком пространственно-временном разрешении. С этой целью в настоящей работе проведено исследование вычислительной устойчивости численной модели высокоширотной ионосферы (эйлеров подход) при задании разных шагов интегрирования по времени и по пространству. Показано, что модель ионосферы при всех выбранных шагах сохраняет вычислительную устойчивость, а результаты численных расчетов качественно совпадают и описывают основные крупномасштабные структурные образования высокоширотной ионосферы. Полученные результаты показали, что разработанная модель может быть использована в исследовании нестационарных процессов, протекающих в ионосферной плазме, а также в исследовании ионосферы в период магнитных бурь и суббурь.

Ключевые слова: высокоширотная ионосфера, моделирование ионосферы, нестационарная модель, переменные Эйлера, несовпадение полюсов, магнитосферная конвекция, язык ионизации, главный ионосферный провал, контроль мировым временем, устойчивость численного решения.

Для цитирования: Гололобов А. Ю., Голиков И. А. Исследование вычислительной устойчивости модели высокоширотной ионосферы. *Вестник СВФУ*. 2024, Т. 21, №2. С. 37–45. DOI: 10.25587/2222-5404-2024-21-2-37-45

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (номер государственной регистрации № 122011700182-1).

Study of computational stability of the high-latitude ionosphere model

A. Yu. Gololobov ✉, I. A. Golikov

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

✉ gololobov@ikfia.ysn.ru

Abstract. The high latitude ionospheric plasma is a difficult medium to describe due to the dependence of its parameters on heliogeophysical conditions. Its large-scale structure is influenced by processes such as magnetospheric convection, plasmaspheric flows of particles and heat, as well as the precipitation of energetic particles in the region of the auroral oval. These processes are non-stationary and their characteristics change significantly during periods of enhanced geomagnetic activity. Therefore, the modelling of the high-latitude ionosphere is associated with the development of a model that has a computationally stable numerical solution at a sufficiently high spatio-temporal resolution. For this purpose, in this work, we have carried out a study of the computational stability of the mathematical model of the high-latitude ionosphere (Eulerian approach) when different integration steps in time and space are specified. It is shown that the ionospheric model retains computational stability at all selected steps, and the results of numerical calculations are qualitatively consistent and describe the main large-scale structural formations of the high-latitude ionosphere. The results show that the developed model can be used in the study of non-stationary processes occurring in the ionospheric plasma, as well as in the study of the ionosphere during magnetic storms and substorms.

Keywords: high-latitude ionosphere, ionospheric modeling, non-stationary model, Euler variables, displacement of poles, magnetospheric convection, ionisation tongue, main ionospheric trough, universal time control, stability of the numerical solution.

For citation: Gololobov AYu, Golikov IA. Study of computational stability of the high-latitude ionosphere model. *Vestnik of NEFU*. 2024, Vol. 21, No. 2. Pp. 37–45. DOI: 10.25587/2222-5404-2024-21-2-37-45

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Education and Science of Russia (state registration number No. 122011700182-1).

Введение

Ионосфера Земли в области высоких широт характеризуется неоднородной структурой, обусловленной в основном наличием крупномасштабной магнитосферной конвекции и высыпаниями энергичных частиц в области аврорального овала. Эти процессы приводят к регулярным образованиям в распределении концентрации электронов (n_e), таких, как главный ионосферный провал (ГИП) в широтном распределении электронной концентрации, полярный и авроральный пики в области высыпаний заряженных частиц, «полярная полость» и «язык ионизации» [1, 2]. Наряду с данными образованиями в периоды геомагнитной активности в субавроральной ионосфере могут наблюдаться «поляризационный джет» или SAID [3–5], представляющий собой узкий и быстрый дрейф плазмы, направленный к западу, приводящий к формированию узкого по широте провала концентрации электронов. Механизмы формирования каждой из этих структурных образований различны, поэтому также отличаются и их характерные пространственные масштабы и времена жизни. В периоды спокойных геомагнитных условий процессы, протекающие в высоких широтах, можно принять условно стационарными, однако в периоды геомагнитных возмущений они принимают нестационарный характер. По этой причине модели ионосферы, описывающие состояние высокоширотной ионосферы в периоды геомагнитной активности должны быть

нестационарными и позволять производить расчеты с требуемым пространственно-временным разрешением, и при этом они должны обладать вычислительной устойчивостью при разных шагах интегрирования как по пространству, так и по времени.

Настоящая работа посвящена исследованию вычислительной устойчивости нестационарной модели высокоширотной ионосферы в переменных Эйлера [6, 7] для разных шагов интегрирования по времени и пространству. Отметим, что ранее с помощью данной модели проведены исследования состояния ионосферы для условий умеренной геомагнитной активности ($K_p \leq 3$) [7–9]. Описаны суточные изменения крупномасштабной структуры высокоширотной и субавроральной ионосферы при шаге интегрирования по времени в основном 1 час.

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 [6, 7]. 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 [10, 11]. Температура и концентрация нейтральных компонент рассчитывались по модели термосферы NRLEMSIS-00 [12]. Для расчета распределения средних энергий и потоков энергии выпадающих электронов использована модель авроральных выпадений APM (Auroral Precipitation Model) [13], а функция ионообразования выпадающими частицами рассчитывается по формуле, предложенной в [14]. Скорости фотоионизации при больших зенитных углах Солнца ($\chi > 75^\circ$) рассчитаны согласно [15]. В настоящей работе магнитосферная конвекция задана с помощью модели электрического поля «А» Хеппнера [16, 17]. Учет несовпадения географического и геомагнитного полюсов проводится следующим образом. Компоненты электрического поля и скорости магнитосферной конвекции, зоны выпадания 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° с. ш., 291° в. д. [18].

Алгоритм решения системы моделирующих уравнений рассмотрен в [6, 7]. Для численного решения системы трехмерных дифференциальных уравнений используется метод суммарной аппроксимации [19], 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 приравняются к температуре нейтрального газа.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены рассчитанные распределения электронов на высоте максимума области F2 ионосферы ($n_m F2$), полученные при разных шагах интегрирования по времени (Δt) в момент 18 UT. С целью изучения вычислительной устойчивости численного решения моделирующих уравнений шаги варьировались в пределах от 1 до 3600 секунд ($\Delta t = 1, 10, 60, 300, 1800, 3600$ сек). Расчеты проведены для условий зимнего солнцестояния ($\delta = -23^\circ$), средней солнечной ($F_{107} = 150$) и умеренной геомагнитной активностях ($K_p < 3$) при следующих пространственных шагах: $\Delta r = 10$ км, $\Delta \theta = 2^\circ$, $\Delta \varphi = 10^\circ$.

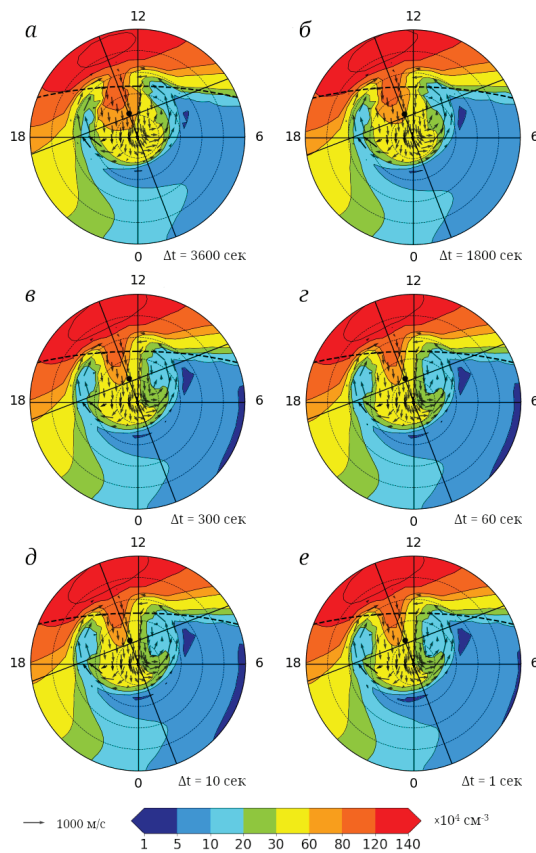


Рис. 1. Распределение электронной концентрации на высоте максимума области F2 ($n_m F2$) в 18 UT при разных шагах интегрирования по времени (Δt)

Fig. 1. Distribution of electron concentration at an altitude of the F2 region maximum ($n_m F2$) at 18 UT at different time integration steps (Δt)

При каждом шаге по времени расчеты проводились до тех пор, пока решение задачи не выйдет на стационарный режим (~1.5 суток). Концентрические окружности соответствуют географическим широтам северного полушария, проведенным через 10° . Внешний круг соответствует 40° с. ш. 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 $11,5^\circ$. Стрелками даны скорости дрейфа ионосферной плазмы, обусловленные электрическим полем магнитосферной конвекции, которое задано на основе модели Хеппнера [2, 16, 17]. Длины и направления стрелок обозначают величину скорости дрейфа и его направление. Видно, что заряженные частицы в области полярной шапки конвекцией переносятся на ночную сторону с последующим поворотом в утреннем и вечернем секторах на солнечную по более низким широтам (рис. 1a). В результате картина конвекции принимает структуру с утренней и вечерней ячейками. Как видно, результаты численных расчетов при всех значениях Δt качественно совпадают. В 18 UT вследствие несовпадения географического и геомагнитного полюсов область конвекции находится частично на освещенной стороне. В этих условиях пространственное распределение электронов принимает следующий вид: над полярной шапкой в результате заноса дневной ионизации на ночную сторону антисолнечным потоком плазмы формируется «язык ионизации»; в утреннем и вечернем секторах на широтах

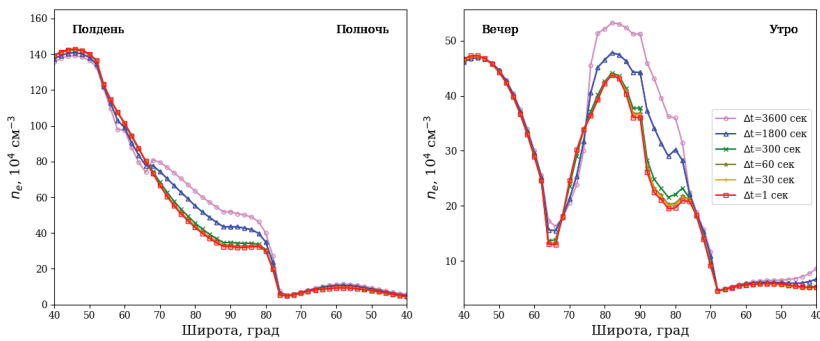


Рис. 2. Широтные профили концентрации электронов (n_e) на высоте 300 км при разных шагах интегрирования по времени (Δt)

Fig. 2. Latitudinal profiles of electron concentration (n_e) at an altitude of 300 km at different time integration steps (Δt)

ниже «языка ионизации» около терминатора наблюдаются области низких $n_m F2$ в виде желобов. Эти провалы обусловлены выносом ночной низкой, относительно дневной ионосферы, ионизации на освещенную сторону конвекцией, направленной на дневную сторону [7]; в ночном секторе на широтах около 70° с. ш. формируется главный ионосферный провал (ГИП), где $n_m F2 \approx 10^4 \text{ см}^{-3}$.

Сравнение результатов расчетов при разных Δt показало, что наибольшие расхождения результатов наблюдаются в области действия магнитосферной конвекции. При $\Delta t = 3600$ сек (рис. 1а) антисолнечная конвекция заносит дневную ионизацию наиболее глубоко в полярную область по сравнению с другими расчетами. Так на широтах выше 80° с. ш. в полуденном секторе $n_m F2$ достигает $6 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ (рис. 1а), тогда как в других расчетах $n_m F2 \approx 3 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ (рис. 1б, в, г, д, е). При шагах интегрирования $\Delta t = 3600$ и 1800 сек наблюдается обычная форма «языка ионизации» без особых изменений (рис. 1а, б). При малых шагах $\Delta t \leq 300$ сек «язык ионизации» становится более узким, а концентрация электронов уменьшается (рис. 1в, г, д, е). Видно, что различия между результатами численных расчетов при $\Delta t = 300, 60, 10$ и 1 секунда несущественны.

На рис. 2 показаны рассчитанные широтные профили концентрации электронов (n_e) на высоте 300 км в меридиональных плоскостях полдень–полночь и утро–вечер при разных шагах по времени (Δt). В плоскости полдень–полночь расхождения между результатами расчетов наблюдаются в интервале широт от $\sim 60^\circ$ с. ш. в полуденном секторе до $\sim 78^\circ$ с. ш. в полуночном и достигают местами до $\sim 39\%$. В плоскости утро–вечер расхождения наблюдаются в интервале от $\sim 65^\circ$ с. ш. в вечернем секторе до $\sim 76^\circ$ с. ш. в утреннем. Расхождения здесь достигают $\sim 45\%$. Отметим, что выбор Δt также влияет на глубину провала n_e . При $\Delta t = 3600$ сек в области провала около 65° с. ш. в вечернем секторе $n_e = 1,7 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$, а при $\Delta t \leq 300$ сек $n_m F2 \approx 1,3 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$. Расхождения между рассчитанными n_e при $\Delta t \leq 300$ сек несущественны. Таким образом, результаты численных расчетов при разных шагах Δt качественно совпадают, что является свидетельством вычислительной устойчивости модели при шагах интегрирования по времени в пределах от 1 до 3600 секунды. Чем меньше шаг интегрирования, тем более точные результаты можно получить. При этом важным является вопрос выбора оптимального шага интегрирования, который позволяет достичь баланса между точностью и вычислительной эффективностью. Как видно, при больших шагах по времени ($\Delta t \geq 1800$ сек) в высоких широтах наблюдаются количественные расхождения, обусловленные недостаточно точным описанием процессов магнитосферной конвекции, поэтому оптимальными шагами по времени можно принять интервал от 60 до 300 сек для исследования крупномасштабной структуры высокоширотной ионосферы.

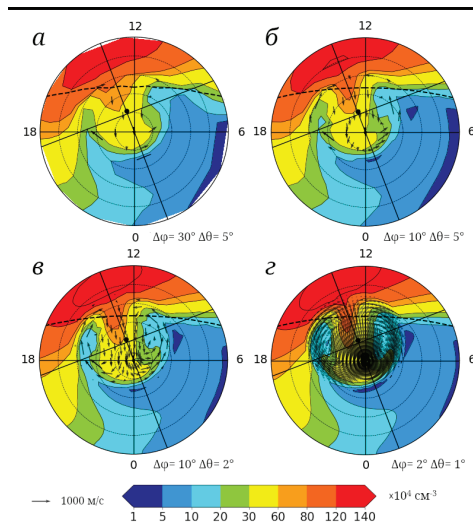


Рис. 3. Распределение электронной концентрации на высоте максимума области F2 ($n_m F2$) в 18 UT при разных шагах интегрирования по долготе ($\Delta\varphi$) и широте ($\Delta\theta$)

Fig. 3. Distribution of electron concentration at an altitude of the F2 ($n_m F2$) region maximum at 18 UT at different integration steps in longitude ($\Delta\varphi$) and latitude ($\Delta\theta$)

Рассмотрим результаты численных расчетов при разных шагах по пространству. На рис. 3 показаны рассчитанные распределения $n_m F2$, полученные при задании разных шагов интегрирования по долготе ($\Delta\varphi$) и широте ($\Delta\theta$). При этом шаги интегрирования по высоте и времени приняты равными 10 км и 300 сек соответственно. Видно, что для всех вариантов расчетов наблюдается формирование «языка ионизации», провалов ионизации в виде желобов в утреннем и вечернем секторах и ГИП в ночном секторе (рис. 3). Качественное согласие результатов численных расчетов при разных пространственных шагах свидетельствует о вычислительной устойчивости разработанной модели. Однако при больших $\Delta\varphi$ и $\Delta\theta$ (рис. 3а, б) пространственное разрешение наблюдаемых структурных образований в распределении $n_m F2$ хуже, чем при малых шагах (рис. 3в, з), что естественно.

На рис. 4 показаны широтные профили n_e на высоте 300 км в меридиональных плоскостях полдень–полночь и утро–вечер. Видно, что изменение шагов интегрирования

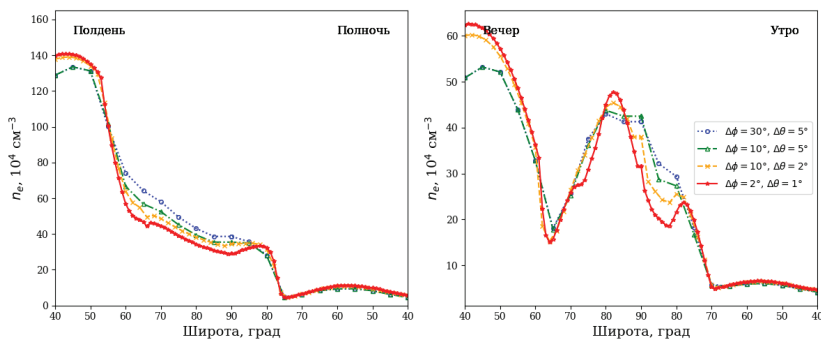


Рис. 4. Широтные профили концентрации электронов (n_e) на высоте 300 км в меридиональных плоскостях полдень–полночь и вечер–утро при разных шагах интегрирования по долготе ($\Delta\varphi$) и широте ($\Delta\theta$)

Fig. 4. Latitudinal profiles of electron concentration (n_e) at an altitude of 300 km in the meridional planes noon-midnight and evening-morning at different integration steps in longitude ($\Delta\varphi$) and latitude ($\Delta\theta$)

по пространству приводит к расхождениям результатов численных расчетов во всем охватываемом интервале широт. Наибольшие расхождения между результатами расчетов наблюдаются в утреннем секторе в области действия конвекции и достигают ~33%. Приемлемыми пространственными шагами можно считать по широте 1–2 град, а по долготе 2–10 град для исследования поведения крупномасштабной структуры высокоширотной ионосферы.

Заключение

В работе рассмотрен вопрос вычислительной устойчивости модели высокоширотной ионосферы в переменных Эйлера. Результаты численных расчетов показали вычислительную устойчивость разработанной модели ионосферы в переменных Эйлера при разных шагах интегрирования по времени и по пространству, что позволяет использовать ее для исследования нестационарных процессов, протекающих в ионосферной плазме, а также для исследования возмущенной ионосферы, что важно с практической точки зрения. Оптимальными временными шагами можно считать интервал от 60 до 300 сек, а пространственными шагами по широте – интервал от 1 до 2 град, по долготе – от 2 до 10 град в зависимости от конкретной задачи численного моделирования ионосферы.

Л и т е р а т у р а

1. Nishida A. Average structure and storm-time change of polar topside ionosphere at sunspot minimum. *J. Geophys. Res.*, 1967;72(23):6051-6061.
2. Мизун, Ю. Г. Полярная ионосфера / Ю. Г. Мизун. – Ленинград : Наука, 1980. – 216 с.
3. Гальперин, Ю. И. Прямые измерения скорости дрейфа ионов в верхней ионосфере во время магнитной бури. II. Результаты измерений во время магнитной бури 3 ноября 1967 г. / Ю. И. Гальперин, В. Н. Пономарев, А. Г. Зосимова // *Космические исследования.* – 1973б. – Т. 1. – № 2. – С. 284–296.
4. Spiro RW. Rapid subauroral ion drifts observed by Atmospheric Explorer. *Geophys. Res. Lett.*, 1979;6(8):657-660.
5. Поляризационный джет : узкие и быстрые дрейфы субавроральной ионосферной плазмы / А. Е. Степанов, В. Л. Халипов, И. А. Голиков, Е. Д. Бондарь // РАН, Институт космофизических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера. – Якутск, 2017. – 175 с.
6. 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.
7. 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.
8. Гололобов, А. Ю. Моделирование высокоширотной ионосферы с учетом несовпадения географического и геомагнитного полюсов / А. Ю. Гололобов, И. А. Голиков, В. И. Попов // *Вестник Северо-Восточного федерального университета.* – 2014. – Т. 11. – № 2. – С. 46–54.
9. Golikov I. Universal time control of the parameters of the electron temperature enhancement zone in the winter subauroral ionosphere. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.*, 2020;211. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105458>
10. Schunk R. Electron temperature in the F regions of the ionosphere: theory and observations. *Rev. Geophys.*, 1978;16:355–399.
11. David M. The effect of downward electron heat flow and electron cooling processes in the high-latitude ionosphere. *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.*, 2011;73:2399–2409. doi:10.1016/j.jastp.2011.08.009.
12. Picone JM. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparison and scientific issues. *J. Geophys. Res.*, 2002;107:1501–1516. doi:10.1029/2002JA009430.
13. Vorobyev V. Auroral Precipitation Model and its application to ionospheric and magnetospheric studies, *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.*, 2013;102:157–171. doi:10.1016/j.jastp.2013.05.007.
14. Fang X. Electron impact ionisation: A new parameterisation for 100 eV to 1 MeV electrons. *J. Geophys. Res.*, 2008;113. A09311. doi:10.1029/2008JA013384.

15. Chapman S. The absorption and dissociative of ionising effect of monochromatic radiation in an atmosphere on a rotation. *Earth. Proc. Phys. Soc.*, 1931;43:483–501. doi:10.1088/0959-5309/43/5/302.
16. Heppner JR. Empirical model of high-latitude electric field. *J. Geophys. Res.*, 1977;82(7):1115-1125.
17. 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.
18. Schunk RW. *Ionospheres: physics, plasma physics, and chemistry*. NY: Cambridge University Press, 2009:640 p.
19. Samarskiy A. *The theory of difference schemes*. New York: Basel. Marcel., 2001.

References

1. Nishida A. Average structure and storm-time change of polar topside ionosphere at sunspot minimum. *J. Geophys. Res.*, 1967;72(23):6051-6061.
2. Mizun, YuG., *Polar ionosphere*. Moscow : Nauka. 1980.
3. Galperin YuI, Ponomarev VN, Zosimov AG. Direct measurements of ion drift velocity in the upper ionosphere during magnetic storm. II. The measurement results during the magnetic storm 3 November 1967. *Cosmic investigations*, 1973;1(2):284-296.
4. Spiro RW. Rapid subauroral ion drifts observed by Atmospheric Explorer. *Geophys. Res. Lett.*, 1979;6(8):657-660.
5. Stepanov AE, Khalipov VL, Golikov IA, et al. Polarisation jet: thin and fast subauroral ionospheric plasma drift, Russian academy of science, Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy, Yakutsk, 2017.
6. Golikov IA, Gololobov AYu, Popov VI. Numerical modeling of the thermal regime of the high-latitude ionosphere, *Vestnik of North-Eastern Federal University*, 2012;9(3):22–28.
7. Golikov IA, Gololobov AYu, Popov VI. Modeling the electron temperature distribution in F2 region of high-latitude ionosphere for winter solstice conditions. *Solar-Terrestrial Physics*, 2016;2(4):70-80.
8. Gololobov AYu, Golikov IA, Popov VI. Mathematical modeling of the high-latitude ionosphere taking into account offset between geographical and geomagnetic poles. *Vestnik of North-Eastern Federal University*, 2014;11(2):46–54.
9. Golikov I. Universal time control of the parameters of the electron temperature enhancement zone in the winter subauroral ionosphere. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.*, 2020;211. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105458>
10. Schunk R. Electron temperature in the F regions of the ionosphere: theory and observations. *Rev. Geophys.*, 1978;16:355–399.
11. David M. The effect of downward electron heat flow and electron cooling processes in the high-latitude ionosphere. *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.*, 2011;73:2399–2409. doi:10.1016/j.jastp.2011.08.009.
12. Picone JM. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparison and scientific issues. *J. Geophys. Res.*, 2002;107:1501–1516. doi:10.1029/2002JA009430.
13. Vorobyev V. Auroral Precipitation Model and its application to ionospheric and magnetospheric studies, *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.*, 2013;102:157–171. doi:10.1016/j.jastp.2013.05.007.
14. Fang X. Electron impact ionisation: A new parameterisation for 100 ev to 1 MeV electrons. *J. Geophys. Res.*, 2008;113. A09311. doi:10.1029/2008JA013384.
15. Chapman S. The absorption and dissociative of ionising effect of monochromatic radiation in an atmosphere on a rotation. *Earth. Proc. Phys. Soc.*, 1931;43:483–501. doi:10.1088/0959-5309/43/5/302.
16. Heppner JR. Empirical model of high-latitude electric field. *J. Geophys. Res.*, 1977;82(7):1115-1125.
17. Osipov NK, Chernysheva SP, Mozhaev AM, et al. The role of convection, diffusion and flow exchange between the ionosphere and magnetosphere in the formation of the main structural forms of the F-region of the polar ionosphere. *Proceeding of USSR Academy of Sciences conference “Dynamic processes and structure of the polar ionosphere. Apatity”*, Apatity, 1980;11-21.

18. Schunk RW. Ionospheres: physics, plasma physics, and chemistry. NY: Cambridge University Press, 2009:640 p.

19. Samarskiy A. The theory of difference schemes. New York: Basel. Marcel, 2001.

ГОЛОЛОБОВ Артем Юрьевич – к. ф.-м. н., с. н. с. лаборатории магнитосферно-ионосферных исследований, Институт космических исследований и астрономии им. Ю.Г. Шафера СО РАН.

Artem Y. GOLOLOBOV – Cand. S. (in Phys. & Math.), Senior Researcher, Laboratory of Magnetospheric and Ionospheric Researches, ShICRA SB RAS.

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

Innikentiy A. GOLIKOV – Dr. S. (in Phys. & Math.), Professor, Chief Researcher, Laboratory of Magnetospheric and Ionospheric Researches, ShICRA SB RAS.