

ИССЛЕДОВАНИЕ СЕЗОННЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ ОБЛАСТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В СУБАВРОРАЛЬНОЙ ИОНОСФЕРЕ

INVESTIGATING SEASONAL FEATURES OF ELECTRON TEMPERATURE ENHANCEMENT REGIONS IN THE SUBAURORAL IONOSPHERE

А.Ю. Гололобов

Северо-Восточный федеральный университет
им. М.К. Аммосова, Якутск, Россия, golart87@gmail.com

И.А. Голиков

Институт космических исследований и аэронавтики
им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск, gia2008@mail.ru

A.Yu. Gololobov

M.K. Ammosov North-Eastern Federal University,
Yakutsk, Russia, golart87@gmail.com

I.A. Golikov

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy,
Yakutsk, Russia, gia2008@mail.ru

Аннотация. Известно, что в области главного ионосферного провала (ГИП) наблюдается повышение температуры электронов T_e в периоды геомагнитных возмущений. В настоящей работе проведено исследование особенностей формирования областей повышения электронной температуры в субавроральной ионосфере на основе сопоставления результатов численного моделирования и измерений концентрации электронов n_e и T_e на ИСЗ CHAMP в условиях умеренной геомагнитной активности. Показано, что в зависимости от положения терминатора и мирового времени UT конфигурации областей повышения T_e в субавроральной ионосфере в разные сезоны существенно различаются. Так, в зимний период возможны формирования кольцообразной и серпообразной областей, а в равноденственный и летний периоды — в основном серпообразной различной длины и четкости.

Ключевые слова: субавроральная ионосфера, численная модель, повышение электронной температуры, сезонные особенности, кольцевой ток, кольцообразная и серпообразная области, ИСЗ CHAMP.

Abstract. The electron temperature enhancement is known to occur in the main ionospheric trough during geomagnetic disturbances. In this paper, we study features of the formation of the electron temperature (T_e) enhancement in the subauroral ionosphere by comparing results of the numerical simulation with measurements of T_e onboard the CHAMP satellite under moderate geomagnetic activity conditions. It is shown that depending on the terminator position and universal time (UT), the location of the enhanced T_e regions in the subauroral ionosphere varies in different seasons. So, in winter ring-shaped and sickle-shaped regions can be formed, whereas during the equinox and summer periods sickle-shaped regions of different lengths and clarity are generally observed.

Keywords: subauroral ionosphere, numerical model, electron temperature enhancement, seasonal features, ring current, ring-shaped and sickle-shaped regions, CHAMP.

ВВЕДЕНИЕ

В работах [Brace et al., 1982; Kofman, 1984; Pröls, 2006] по экспериментальным данным были обнаружены эффекты повышения температуры электронов в субавроральной ионосфере. В работе [Pröls, 2006] по данным спутника DE-2 исследовано повышение температуры электронов T_e в субавроральной ионосфере. Установлено, что область повышения T_e пространственно совпадает с положением главного ионосферного провала (ГИП). Численному моделированию теплового режима высокоширотной ионосферы, включая субавроральную, посвящен ряд работ [Клименко и др., 1991; Мингалева, Мингалева, 1992; David et al., 2011; Mingaleva, Mingalev, 1996; Pröls, 2006; Schunk et al., 1986], в которых изучены причины формирования областей с повышенными температурами. Показано, что повышения T_e связаны с нисходящими потоками тепла, электрическими полями и пониженными значениями концентрации электронов n_e в области ГИП. В [Бюхнер и др., 1983; Крымский,

1990; Cole, 1965; Pröls, 2006] сделано предположение, что возможной причиной повышения T_e в субавроральной ионосфере может быть кольцевой ток, который возрастает в периоды возмущений. Тепло, генерируемое частицами кольцевого тока на высотах нескольких радиусов Земли, за счет высокой теплопроводности электронного газа может передаваться вниз вдоль силовых линий геомагнитного поля на высоты F-слоя ионосферы, приводя к повышению T_e .

Целью настоящей работы является исследование особенностей формирования областей повышения T_e в субавроральной ионосфере в разные сезоны с помощью численной модели высокоширотной ионосферы и данных ИСЗ CHAMP.

МОДЕЛЬ ВЫСОКОШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ

Расчеты проведены на модели высокоширотной области F ионосферы в переменных Эйлера. Модель позволяет учитывать несовпадение географического

и геомагнитного полюсов [Голиков и др., 2016]. Здесь приведем ее краткое описание. Концентрация ионов атомарного кислорода $n(\text{O}^+)$, температуры электронов T_e и ионов T_i определяются в результате численного решения системы нестационарных трехмерных уравнений, состоящей из уравнений непрерывности для ионов O^+ , теплопроводности для электронов и ионов в интервале высот 120–500 км. В этом интервале можно принять условие квазинейтральности $n_e \approx n(\text{O}^+)$. Далее, скорости охлаждения электронного газа при взаимодействии с нейтральными частицами и ионами заданы согласно [David et al., 2011; Schunk, Nagy, 1978]. Температура и концентрация нейтральных компонент рассчитывались по модели термосферы NRLMSISE-00 [Picone et al., 2002]. Электрическое поле магнитосферной конвекции задано по модели А Хеппнера [Heppner, 1977]. Для расчета скорости корпускулярной ионизации использована модель авроральных высыпаний АРМ (Auroral Precipitation Model) [Vorobjev et al., 2013], а функция ионообразования выпадающими частицами определяется по [Fang et al., 2008]. Скорости волновой ионизации при больших зенитных углах Солнца ($\chi > 75^\circ$) рассчитаны согласно [Chapman, 1931].

Алгоритм решения системы моделирующих уравнений, а также их граничные условия рассмотрены в работах [Голиков и др., 2012, 2016]. Для численного решения трехмерных дифференциальных уравнений используется метод суммарной аппроксимации [Самарский, 1977], в котором решение трехмерных дифференциальных уравнений сводится к последовательному решению системы одномерных уравнений. Далее используется конечно-разностная аппроксимация с последующим приведением к трехточечной схеме, которая решается методом прогонки. В качестве начального условия для $n(\text{O}^+)$ используется простой слой Чепмена, а электронная и ионная температуры приравниваются к температуре нейтрального газа ($T_e = T_i = T_n$). Расчеты проведены при $\Delta r = 10$ км, $\Delta \theta = 2^\circ$, $\Delta \varphi = 10^\circ$, $\Delta t = 2$ мин. На ПК с процессором 2400 МГц и 4000 Мб оперативной памяти время счета для получения периодического решения составляет приблизительно 30 мин.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛЬНЫХ РАСЧЕТОВ

На рис. 1 и 2 приведены распределения n_e и T_e на высоте 300 км для разных сезонов в 05 и 17 UT в координатах местное время (долгота) — географическая широта при задании нисходящего потока тепла $P = -5 \cdot 10^9$ эВ см⁻² с⁻¹, формирующегося в периоды умеренных геомагнитных возмущений ($K_p \approx 3$) за счет кольцевого тока [David et al., 2011] на геомагнитных широтах 58° – 62° . Здесь значения n_e и T_e даны в виде изолиний. Концентрические окружности соответствуют географическим широтам, проведенным через 10° . Цифры у внешнего круга — местное время, а рядом в скобках — географическая долгота. Штриховая линия — положение терминатора при зенитном угле $\chi = 90^\circ$. Точка с двумя взаимно перпендикулярными линиями — геомагнитный полюс. Стрелками показаны скорости электронов, обусловленные электрическим полем

магнитносферного происхождения. Штрихпунктирная окружность — положение плазмопаузы, которая соответствует экваториальной границе области магнитосферной конвекции, — задано по модели А Хеппнера [Heppner, 1977].

В 17 UT геомагнитный полюс располагается вблизи местного полудня и плазмопауза оказывается частично на освещенной стороне. Вследствие этого за счет магнитосферной конвекции путем выноса дневной ионизации на ночную сторону формируется язык ионизации, за которым на неосвещенной стороне происходит понижение n_e , отождествляемое с субавроральной ионосферой и ГИП [Брюнелли, Намгаладзе, 1988] (рис. 1, а). Далее, в субавроральной ионосфере, где был задан нисходящий поток P , формируется область с повышенной T_e , имеющая вид серпообразной зоны, совпадающей по положению с ГИП, где T_e достигает 3000 К и более. В 05 UT геомагнитный полюс находится вблизи полуночного меридиана, а область конвекции — полностью на ночной стороне (рис. 1, б). Вследствие этого наблюдается отрыв языка ионизации от дневной ионосферы с образованием дневного провала между терминатором и областью конвекции. Таким образом, провал n_e в широтном ходе формируется за областью конвекции во всем интервале LT, где из-за потока тепла P в субавроральной ионосфере формируется область повышенных T_e в виде кольца, в которой T_e достигает 2000 К и более (рис. 2, б).

В условиях весеннего равноденствия терминатор смещается вниз до линии 06–18 LT (рис. 1, в, г). Область конвекции находится частично на освещенной стороне и в отличие от зимних условий в 05 UT дневной провал не наблюдается. В распределении T_e влияние нисходящего потока тепла P в субавроральной ионосфере приводит к формированию области повышенных $T_e > 2000$ К в виде серпообразной зоны в интервале ~ 22 – 07 LT как в 17 UT, так и в 05 UT (рис. 2, в, г). При этом данная область проявляется более четко и находится на более низких географических широтах в 05 UT, чем в 17 UT вследствие несовпадения полюсов.

Далее в условиях летнего солнцестояния терминатор перемещается вниз и вся высокоширотная ионосфера в 17 UT оказывается преимущественно на освещенной стороне, в результате чего вероятность повышения T_e на субавроральных широтах существенно уменьшается (рис. 2, д). Для данного сезона характерно то, что нагрев плазмы за счет потока тепла P приводит к повышению T_e в субавроральной ионосфере лишь в 05 UT, когда из-за несовпадения полюсов часть субавроральной ионосферы оказывается на ночной стороне (рис. 2, е).

Можно заключить, что влияние нисходящего потока тепла P приводит к формированию областей с повышенной T_e в субавроральной ионосфере на неосвещенной стороне. При этом конфигурации областей повышения T_e в разные сезоны различны и зависят от мирового времени. Так, зимой в 05 UT повышение T_e имеет вид кольцеобразной области, совпадающей с положением провала n_e , а в 17 UT и в другие сезоны — серпообразной зоны различной длины и четкости.

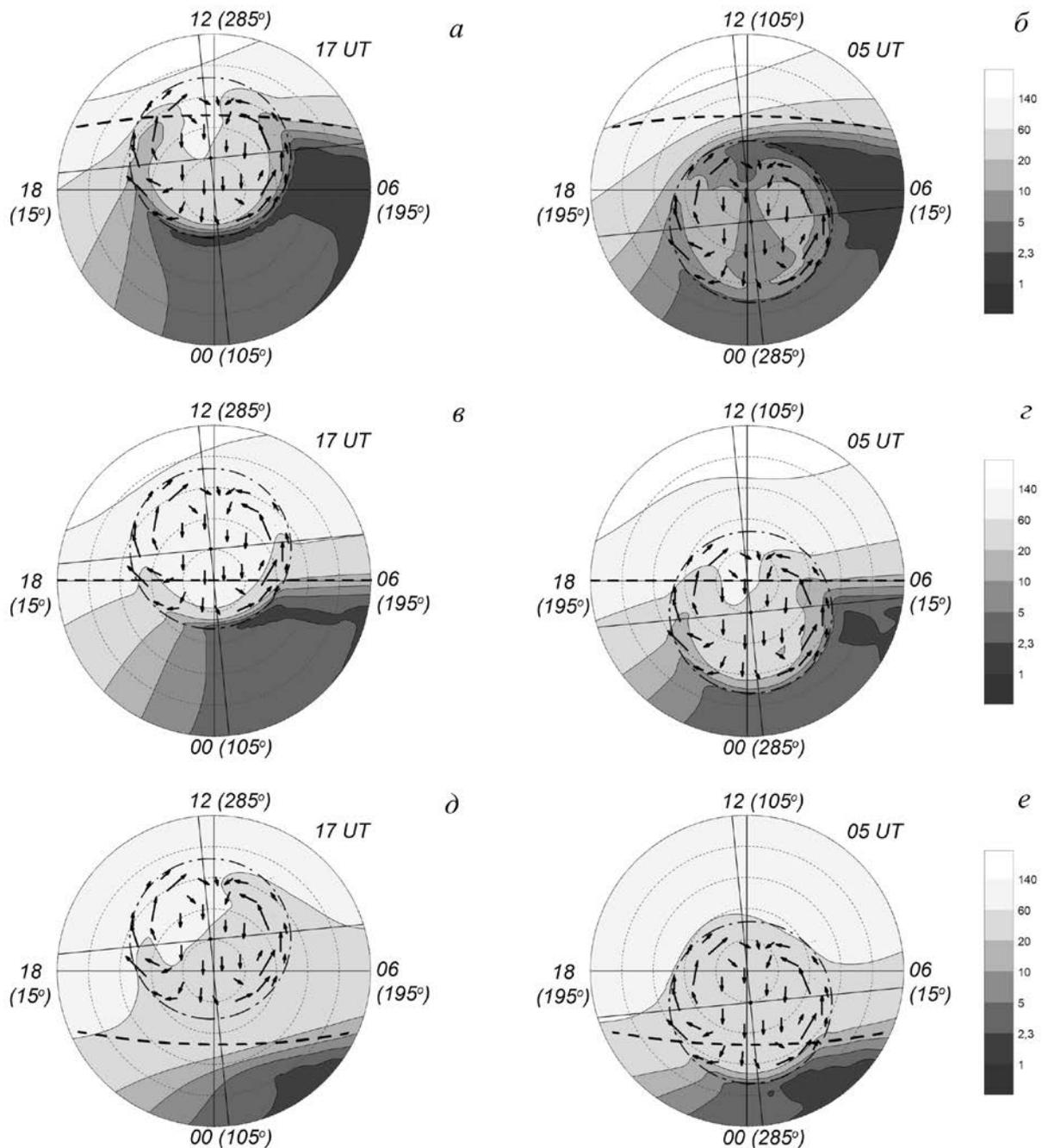


Рис. 1. Рассчитанные распределения концентрации электронов (в ед. 10^4 см^{-3}) на высоте 300 км в 05 и 17 UT для условий зимнего солнцестояния (а, б), весеннего равноденствия (в, г) и летнего солнцестояния (д, е)

СОПОСТАВЛЕНИЕ С ДАННЫМИ ШАМР

Спутник ШАМР был запущен 15 июля 2000 г. с наклоном орбиты 87.3° и проводил измерения n_e и T_e в интервале высот $310 \div 456$ км до 2009 г. [Reigber et al. 2002; Xiong et al., 2013]. Главной особенностью спутника является то, что вследствие несферичности Земли его орбитальная плоскость прецессирует вокруг Земли и в течение приблизительно 130 сут, смещаясь, проходит все сектора местного времени, что позволяет на основе данных спутника изучать пространственно-временные осо-

бенности формирования областей повышения T_e . Здесь рассмотрены пространственно-временные распределения местоположений повышенных значений T_e (пики T_e) в субавроральной ионосфере, построенные нами по данным ШАМР [<http://isdcd-old.gfz-potsdam.de>], для разных сезонов и проведено их сопоставление с результатами модельных расчетов.

На рис. 3 показаны типичные широтные профили n_e и T_e для трех сезонов при умеренной геомагнитной активности. Справа в экваториальной плоскости сплошной линией показаны траектории полета спутника, а стрелки на линиях указывают направленные движения спутника. Цифрами 1 и 2 на широтном

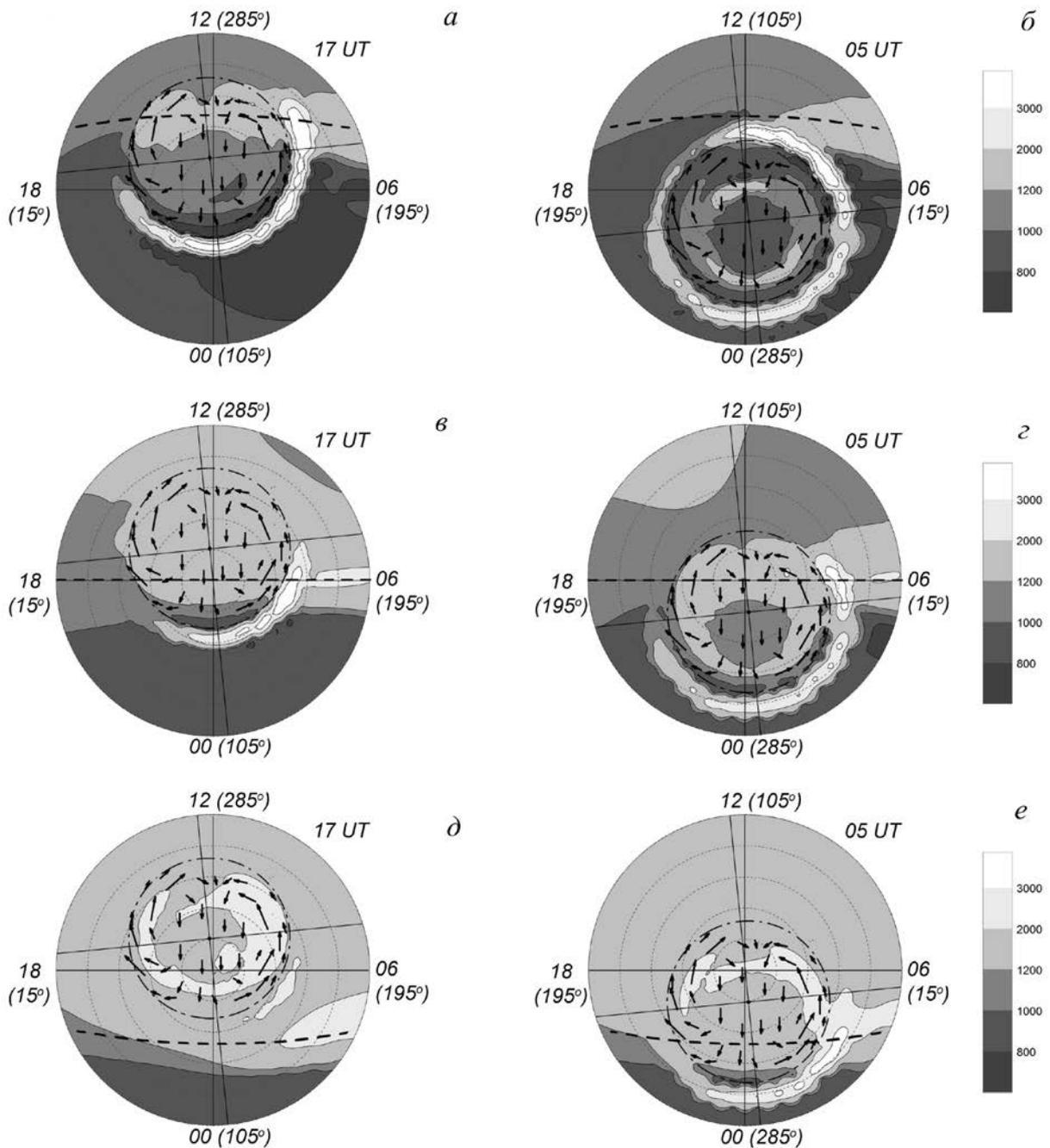


Рис. 2. Рассчитанные распределения температуры электронов (в К) на высоте 300 км в 05 и 17 UT для условий зимнего солнцестояния (а, б), весеннего равноденствия (в, г) и летнего солнцестояния (д, е)

профиле и соответственно на траекториях полета спутника обозначены положения субавроральной ионосферы, определяемые по экваториальной границе авроральной ионизации и положению провала в широтном ходе n_e , а жирными стрелками показаны положения пиков T_e в субавроральной ионосфере. На рис. 3, а видно, что в широтном ходе концентрация электронов за терминатором на ночной стороне начинает резко падать вследствие отсутствия эффективных источников ионизации, образуя дневной провал ионизации в субавроральной ионосфере (1), а в послеполуночном секторе спутник пересекает ГИП (2). В области дневного провала и ГИП регистрируются пики T_e (жирные стрелки), пре-

вышающие 2500 и 6000 К соответственно. В широтных профилях, полученных для равноденственного и летнего сезонов (рис. 3, б, в) из-за освещенности субавроральной ионосферы дневной провал и пики T_e на дневной стороне не проявляются. Положения субавроральной ионосферы на дневной стороне показаны по экваториальной границе авроральной ионизации (1). На рис. 3, б, в на ночной стороне наблюдается ГИП с четкими экваториальной и полярной стенками (2), где T_e повышена и достигает значений приблизительно 2000 К. Видно, что на ночной стороне субавроральной ионосферы в эти сезоны регистрируются как ГИП, так и пики T_e .

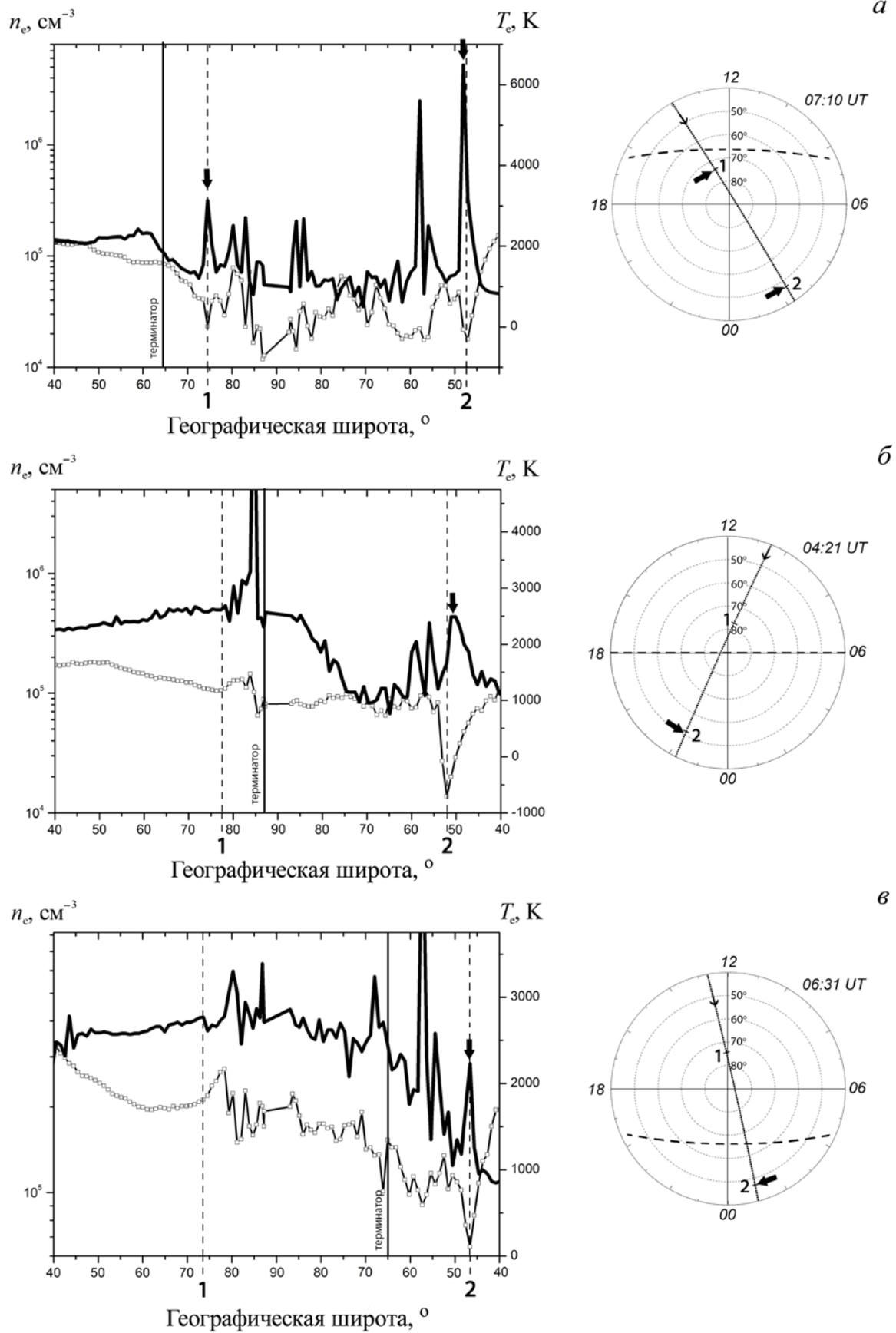


Рис. 3. Широтные профили температуры и концентрации электронов (справа) и траектории полета CHAMP (слева), полученные для зимнего (а), равноденственного (б) и летнего (в) сезонов при $K_p \approx 3$

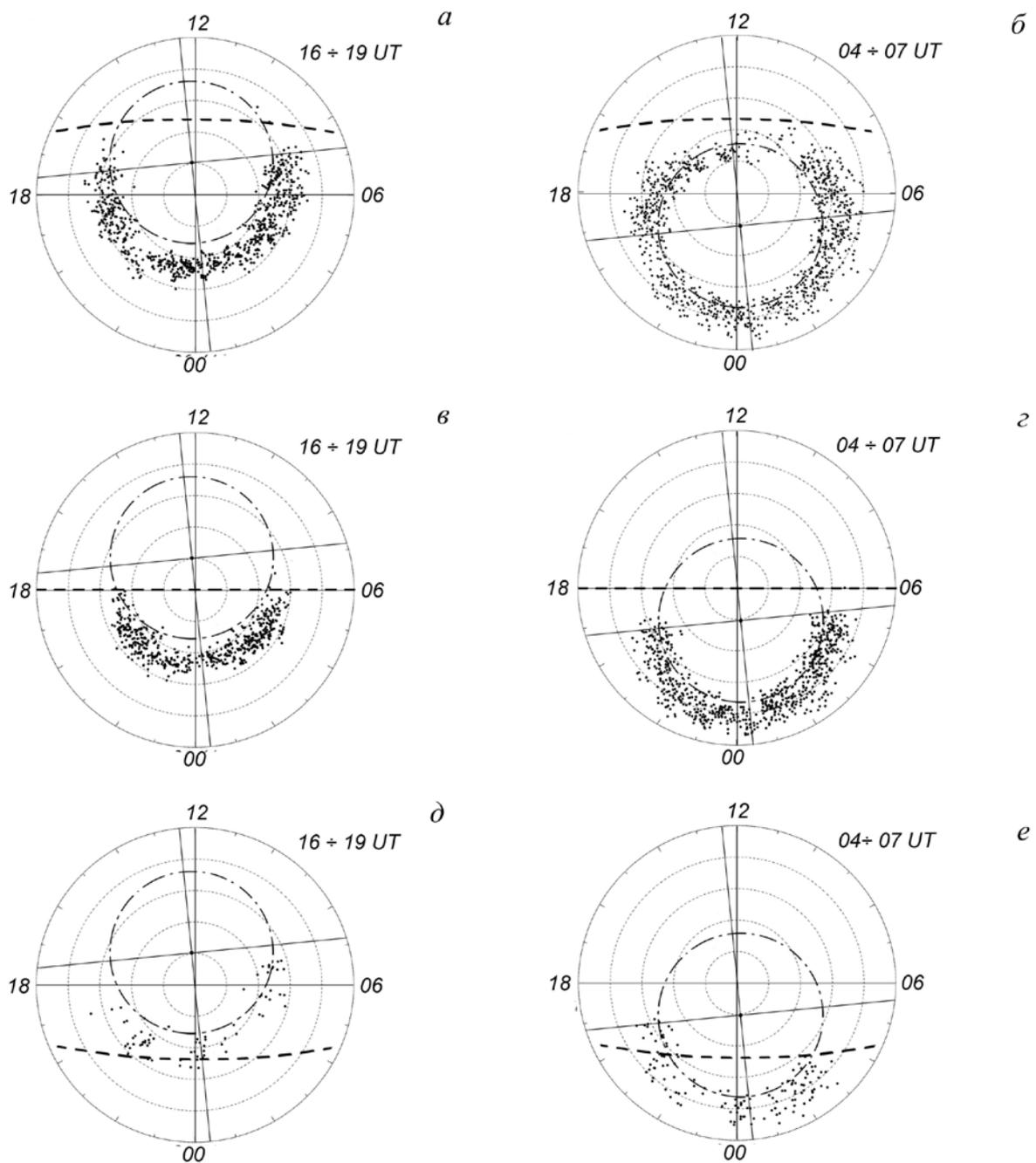


Рис. 4. Пространственное распределение пиков T_e (точки) в координатах местное время — географическая широта по данным СНАМР в интервалах 16–19 UT и 04–07 UT для зимних (а, б), равноденственных (в, в) и летних месяцев (д, е)

На рис. 4 представлены пространственно-временные распределения пиков T_e в субавроральной ионосфере в области ГИП в координатах местное время — географическая широта для зимы (декабрь, январь), равноденствия (март, апрель, сентябрь, октябрь), лета (июнь, июль) в интервалах времени 16–19 UT и 04–07 UT. Здесь обозначения те же, что на рис. 1. Штриховой линией показано положение терминатора при зенитном угле $\chi=90^\circ$, соответствующее условию зимнего солнцестояния ($\delta=-23^\circ$). Штрихпунктирная окружность — положение плазмплаузы для 17 UT и 05 UT, как на рис. 1. Как видно из рис. 4, в зимние месяцы в интервале 16–19 UT местоположения пиков T_e локализованы в серпообразной об-

ласти. Далее, в 04–07 UT пики T_e обнаружены на субавроральных широтах на всех интервалах LT и они пространственно образуют почти кольцеобразную область с минимумом количества пиков T_e в околополюденные часы (рис. 4, б).

В равноденственные месяцы пики T_e локализованы преимущественно на ночной стороне, формируя серпообразную область (рис. 4, в, в), причем в 04–07 UT пики T_e регистрируются на широтах, более низких (рис. 4, в), чем в 16–19 UT, как в случае модельных расчетов вследствие несовпадения полюсов (рис. 2, в).

В летние месяцы (июнь, июль) количество пиков T_e уменьшается (соответственно четкость зоны).

Они в основном расположены на ночной стороне в 04–07 UT, где серпообразная зона проявляется более четко, чем в 16–19 UT (рис. 4, *e*), где субавроральная ионосфера освещена.

Сопоставление результатов модельных расчетов (рис. 2) и измерений T_e на CHAMP (рис. 4) показывает их хорошее качественное согласие как по конфигурации областей повышения T_e в разные моменты UT, так и по сезонным особенностям, связанным с условиями освещенности субавроральной ионосферы в разные сезоны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование сезонных особенностей формирования областей повышения электронной температуры в субавроральной ионосфере в условиях умеренной геомагнитной активности и потока тепла из плазмосферы на основе сопоставления результатов численного моделирования и данных CHAMP показало следующее:

- конфигурации областей повышения T_e в субавроральной ионосфере в разные сезоны существенно различаются и зависят от положения терминатора и от мирового времени вследствие несоответствия географического и магнитного полюсов;
- в зимний период в 04–07 UT в субавроральной ионосфере может формироваться кольцеобразная область повышенных значений T_e , а в 17 UT — область в виде серпообразной зоны;
- в равноденственный и летний периоды области повышения T_e в субавроральной ионосфере имеют вид серпообразной зоны различной длины и четкости.

Работа поддержана грантом РФФИ № 18-45-140037р_а и № 18-45-140003р_а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988. 528 с.
- Бюхнер Й., Леман Х.Р. О возможном механизме магнитосферного происхождения температурного пика в главном ионосферном провале // *Physical Processes in Main Ionospheric Trough Region*. Praha: Geofyz. Ustav CSAV, 1983. 203 с.
- 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. 54–61. DOI: [10.12737/19424](https://doi.org/10.12737/19424).
- Клименко В.В., Кореньков Ю.Н., Намгаладзе А.А. и др. Численное моделирование «горячих пятен» в ионосфере Земли // *Геомагнетизм и аэронавигация*. 1991. Т. 31, № 3. С. 554–557.
- Крымский П.Ф. Азимутальные токи и нагрев плазмы вблизи плазмопаузы в периоды возмущений // *Геомагнетизм и аэронавигация*. 1990. Т. 30, № 5. С. 747–752.
- Мингалева Г.И., Мингалев В.С. Проявления эффекта повышения электронной температуры в главном ионосферном провале за счет внутренних процессов в разные сезоны // *Геомагнетизм и аэронавигация*. 1992. Т. 32, № 2. С. 83–87.

Самарский А.А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1977. 656 с.

Brace L.H., Theis R.F., Hoegy W.R. A global view of F region electron density and temperature at solar maximum // *Geophys. Res. Lett.* 1982. V. 9, N 9. P. 989–992. DOI: [10.1029/GL009i009p00989](https://doi.org/10.1029/GL009i009p00989).

Chapman S. The absorption and dissociative of ionizing effect of monochromatic radiation in an atmosphere on a rotation Earth // *Proc. Phys. Soc.* 1931. V. 43, N 5. P. 483–501. DOI: [10.1088/0959-5309/43/5/302](https://doi.org/10.1088/0959-5309/43/5/302).

Cole K.D. Stable auroral red arcs, sinks for energy of *Dst* main phase // *J. Geophys. Res.* 1965. V. 70, N 7. P. 1689–1709. DOI: [10.1029/JZ070i007p01689](https://doi.org/10.1029/JZ070i007p01689).

David M., Schunk R.W., Sojka J.J. The effect of downward electron heat flow and electron cooling processes in the high-latitude ionosphere // *J. Atm. Solar-Terr. Phys.* 2011. V. 73, N 16. P. 2399–2409. DOI: [10.1016/j.jastp.2011](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2011).

Fang X., Randall C., Lummerzheim D., Solomon S.C. Electron impact ionization: A new parameterization for 100 eV to 1 MeV electrons // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. A09311. DOI: [10.1029/2008JA013384](https://doi.org/10.1029/2008JA013384).

Heppner J.P. Empirical model of high electric field // *J. Geophys. Res.* 1977. V. 82, N 7. P. 1115–1125. DOI: [10.1029/JA082i007p01115](https://doi.org/10.1029/JA082i007p01115).

Kofman W. Very high electron temperature in the daytime F region at Sondrestrom // *Geophys. Res. Lett.* 1984. V. 1, N 9. P. 912–922. DOI: [10.1029/GL011i009p00919](https://doi.org/10.1029/GL011i009p00919).

Mingaleva G.I., Mingalev V.S. The formation of electron temperature hot spots in the main ionospheric trough by the internal processes // *Ann. Geophys.* 1996. V. 15, N. 8. P. 816–825. DOI: [10.1007/s00585-996-0816-x](https://doi.org/10.1007/s00585-996-0816-x).

Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., et al. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparison and scientific issues // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107, N A12. P. 1501–1516. DOI: [10.1029/2002JA009430](https://doi.org/10.1029/2002JA009430).

Pröhl G.W. Subauroral electron temperature enhancement in the nighttime ionosphere // *Ann. Geophys.* 2006. V. 25, N 24. P. 1871–1885.

Reigber C., Lühr H., Schwintzer P. CHAMP mission status // *Adv. Space Res.* 2002. V. 30. P. 129–134. DOI: [10.1016/S0273-1177\(02\)00276-4](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)00276-4).

Schunk R.W., Nagy A.F. Electron temperature in the F regions of the ionosphere: theory and observations // *Rev. Geophys.: Space Phys.* 1978. V. 16, N 3 P. 355–399. DOI: [10.1029/RG016i003p00355](https://doi.org/10.1029/RG016i003p00355).

Schunk R.W., Sojka J.J., Bowline M.D. Theoretical study of the electron temperature in the high-Latitude ionosphere for solar maximum and winter conditions // *J. Geophys. Res.* 1986. V. 91, N 11. P. 12041–12054. DOI: [10.1029/JA091iA11p12041](https://doi.org/10.1029/JA091iA11p12041).

Vorobjev V.G., Yagodkina O.I., Katkalov Yu.V. Auroral precipitation model and its applications to ionospheric and magnetospheric studies // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2013. V. 102. P. 157–171. DOI: [10.1016/j.jastp.2013.05.007](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2013.05.007).

Xiong C., Lühr H., Ma S.Y. The subauroral electron density trough: Comparison between satellite observations and IRI-2007 model estimates // *Adv. Space Res.* 2013. V. 51, N 4. P. 536–544. DOI: [10.1016/j.asr.2011.09.021](https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.09.021).

URL: <http://isdc-old.gfz-potsdam.de> (дата обращения 8 августа 2018).

REFERENCES

- Brace L.H., Theis R.F., Hoegy W.R. A global view of F region electron density and temperature at solar maximum. *Geophys. Res. Lett.* 1982, vol. 9, no. 9, pp. 989–992. DOI: [10.1029/GL009i009p00989](https://doi.org/10.1029/GL009i009p00989).
- Bryunelli B.E., Namgaladze A.A. Physics of the Ionosphere. Moscow, Nauka Publ., 1988, 528 p. (In Russian).
- Büchner J., Lehmann H.-R. On possible mechanism of magnetospheric origin of temperature peak in the main ionospheric trough. *Physical Processes in Main Ionospheric Trough Region*. Praha: Geofyz. Ustav CSAV, 1983, 203 p. (In Russian).

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, no. 5, pp. 483–501. DOI: [10.1088/0959-5309/43/5/302](https://doi.org/10.1088/0959-5309/43/5/302).

Cole K.D. Stable auroral red arcs, sinks for energy of *Dst* main phase. *J. Geophys. Res.* 1965, vol. 70, no. 7, pp. 1689–1709. DOI: [10.1029/JZ070i007p01689](https://doi.org/10.1029/JZ070i007p01689).

David M., Schunk R.W., Sojka J.J. The effect of downward electron heat flow and electron cooling processes in the high-latitude ionosphere. *J. Atm. Solar-Terr. Phys.* 2011, vol. 73, no. 16, pp. 2399–2409. DOI: [10.1016/j.jastp.2011](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2011).

Fang X., Randall C., Lummerzheim D., Solomon S.C., Electron impact ionization: A new parameterization for 100 eV to 1 MeV electrons. *J. Geophys. Res.* 2008, vol. 113, A09311. DOI: [10.1029/2008JA013384](https://doi.org/10.1029/2008JA013384).

Golikov I.A., Gololobov A.Yu., Popov V.I. Numerical simulation of thermal conditions of the high-latitude ionosphere. *Vestnik Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta* [Vestnik of North-Eastern Federal University]. 2012, vol. 9, no. 3, pp. 22–28. (In Russian).

Golikov I.A., Gololobov A.Yu., Popov V.I. Modeling the electron temperature distribution in F2 region of high-latitude ionosphere for winter solstice conditions. *Solar-Terr. Phys.* 2016, vol. 2, no. 4, pp. 70–80. DOI: [10.1029/GL009i009p00989](https://doi.org/10.1029/GL009i009p00989).

Heppner J.P. Empirical model of high electric field. *J. Geophys. Res.* 1977, vol. 82, no. 7, pp. 1115–1125. DOI: [10.1029/JA082i007p01115](https://doi.org/10.1029/JA082i007p01115).

Klimenko V.V., Koren'kov Yu.N., Namgaladze A.A., Karpov I.V., Surotkin V.A., Naumova N.M. Numerical simulation of “hot spots” in the Earth’s ionosphere. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy] 1991, vol. 31, no. 3, pp. 554–557. (In Russian).

Krymsky P.F. Azimuth currents and plasma heating in the vicinity of the plasmopause during disturbances. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 1990, vol. 30, no. 5, pp. 747–752. (In Russian).

Kofman W. Very high electron temperature in the daytime F region at Sondrestrom. *Geophys. Res. Lett.* 1984, vol. 1, no. 9, pp. 912–922. DOI: [10.1029/GL011i009p00919](https://doi.org/10.1029/GL011i009p00919).

Mingaleva G.I., Mingalev V.S. Manifestations of the effect of electron temperature increase in the main ionospheric trough due to internal processes in different seasons. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 1992, vol. 32, no. 2, pp. 83–87. (In Russian).

Mingaleva G.I., Mingalev V.S. The formation of electron temperature hot spots in the main ionospheric trough by the internal processes. *Ann. Geophys.* 1996, vol. 15, no. 8, pp. 816–825. DOI: [10.1007/s00585-996-0816-x](https://doi.org/10.1007/s00585-996-0816-x).

Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., et al. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparison and scientific issues. *J. Geophys. Res.* 2002, vol. 107, no. A12, pp. 1501–1516. DOI: [10.1029/2002JA009430](https://doi.org/10.1029/2002JA009430).

Pröller G.W. Subauroral electron temperature enhancement in the nighttime ionosphere. *Ann. Geophys.* 2006, vol. 25, no. 24, pp. 1871–1885.

Reigber C., Lühr H., Schwintzer P. CHAMP mission status. *Adv. Space Res.* 2002, vol. 30, pp. 129–134. DOI: [10.1016/S0273-1177\(02\)00276-4](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)00276-4).

Samarsky A.A. The theory of difference scheme. Moscow, Nauka Publ., 1977, 656 p. (In Russian).

Schunk R.W., Nagy A.F. Electron temperature in the F regions of the ionosphere: theory and observations. *Rev. Geophys.: Space Phys.* 1978, vol. 16, no. 3, pp. 355–399. DOI: [10.1029/RG016i003p00355](https://doi.org/10.1029/RG016i003p00355).

Schunk R.W., Sojka J.J., Bowline M.D. Theoretical study of the electron temperature in the high-Latitude ionosphere for solar maximum and winter conditions. *J. Geophys. Res.* 1986, vol. 91, no. 11, pp. 12041–12054. DOI: [10.1029/JA091iA11p12041](https://doi.org/10.1029/JA091iA11p12041).

Vorobjev V.G., Yagodkina O.I., Katkalov Yu.V. Auroral precipitation model and its applications 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).

Xiong C., Lühr H., Ma S.Y. The subauroral electron density trough: Comparison between satellite observations and IRI-2007 model estimates. *Adv. Space Res.* 2013, vol. 51, no. 4, pp. 536–544. DOI: [10.1016/j.asr.2011.09.021](https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.09.021).

URL: <http://isdsc-old.gfz-potsdam.de> (accessed 8 August 2018).

Как цитировать эту статью

Гололобов А.Ю., Голиков И.А. Исследование сезонных особенностей формирования областей повышения электронной температуры в субавроральной ионосфере. *Солнечно-земная физика*. 2019. Т. 5, № 1. С. 82–89. DOI: [10.12737/szf-51201909](https://doi.org/10.12737/szf-51201909).