

## 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 аэронауки  
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 кольцеобразной и серповидной областей, а в равноденственный и летний периоды — в основном серповидной различной длины и четкости.

**Ключевые слова:** субавроральная ионосфера, численная модель, повышение электронной температуры, сезонные особенности, кольцевой ток, кольцеобразная и серповидная 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; Pröller, 2006] по экспериментальным данным были обнаружены эффекты повышения температуры электронов в субавроральной ионосфере. В работе [Pröller, 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; Pröller, 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; Pröller, 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  $\text{O}^+$ , 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<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup>, формирующегося в периоды умеренных геомагнитных возмущений ( $K_p \approx 3$ ) за счет кольцевого тока [David et al., 2011] на геомагнитных широтах  $58^\circ$ – $62^\circ$ . Здесь значения  $n_e$  и  $T_e$  даны в виде изолиний. Концентрические окружности соответствуют географическим широтам, проведенным через  $10^\circ$ . 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  $\sim 22$ – $07$  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.

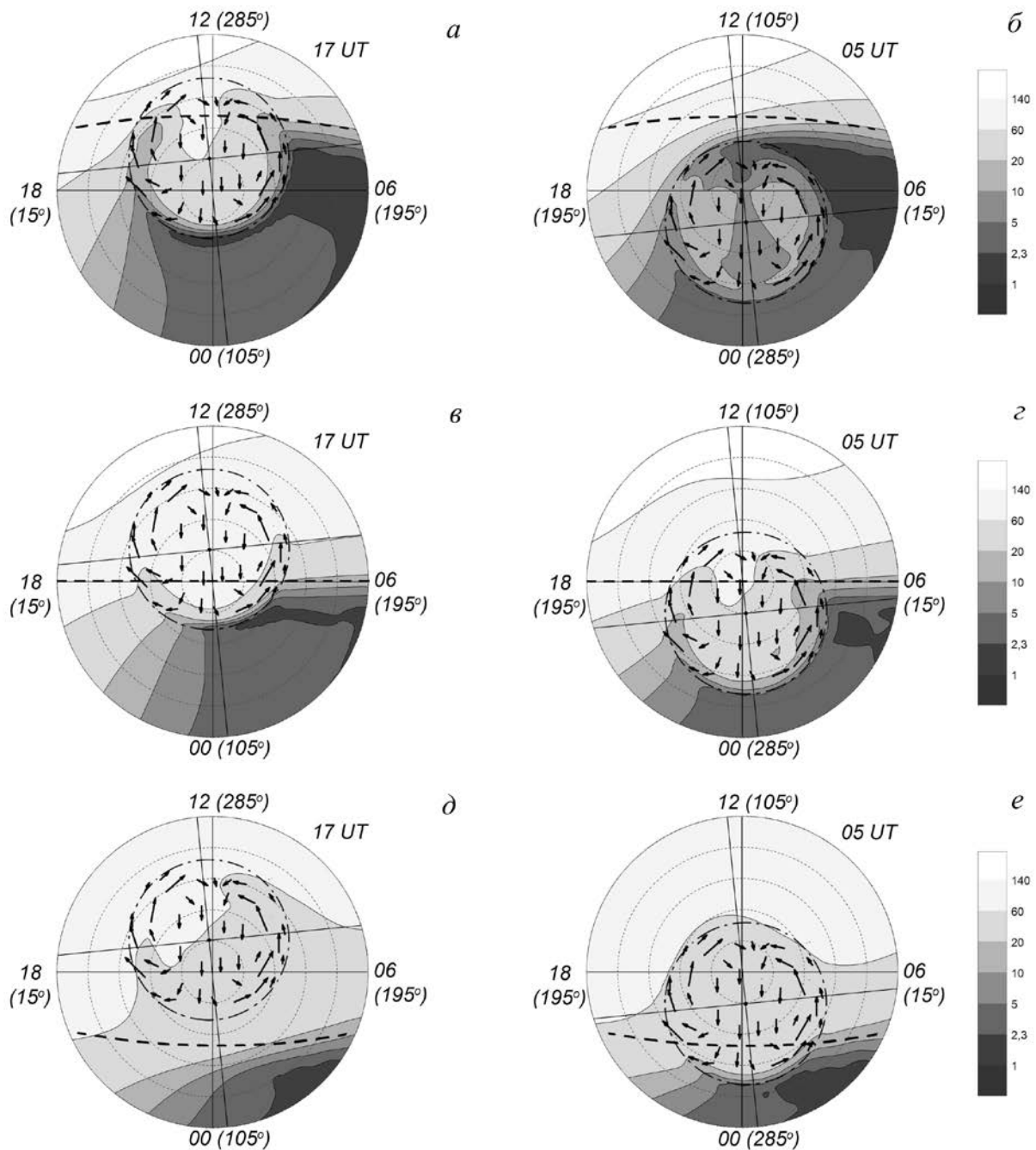


Рис. 1. Рассчитанные распределения концентрации электронов (в ед.  $10^4 \text{ см}^{-3}$ ) на высоте 300 км в 05 и 17 UT для условий зимнего солнцестояния (а, б), весеннего равноденствия (в, в) и летнего солнцестояния (д, е)

### СОПОСТАВЛЕНИЕ С ДАННЫМИ ШАМР

Спутник ШАМР был запущен 15 июля 2000 г. с наклоном орбиты  $87.3^\circ$  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://isd-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

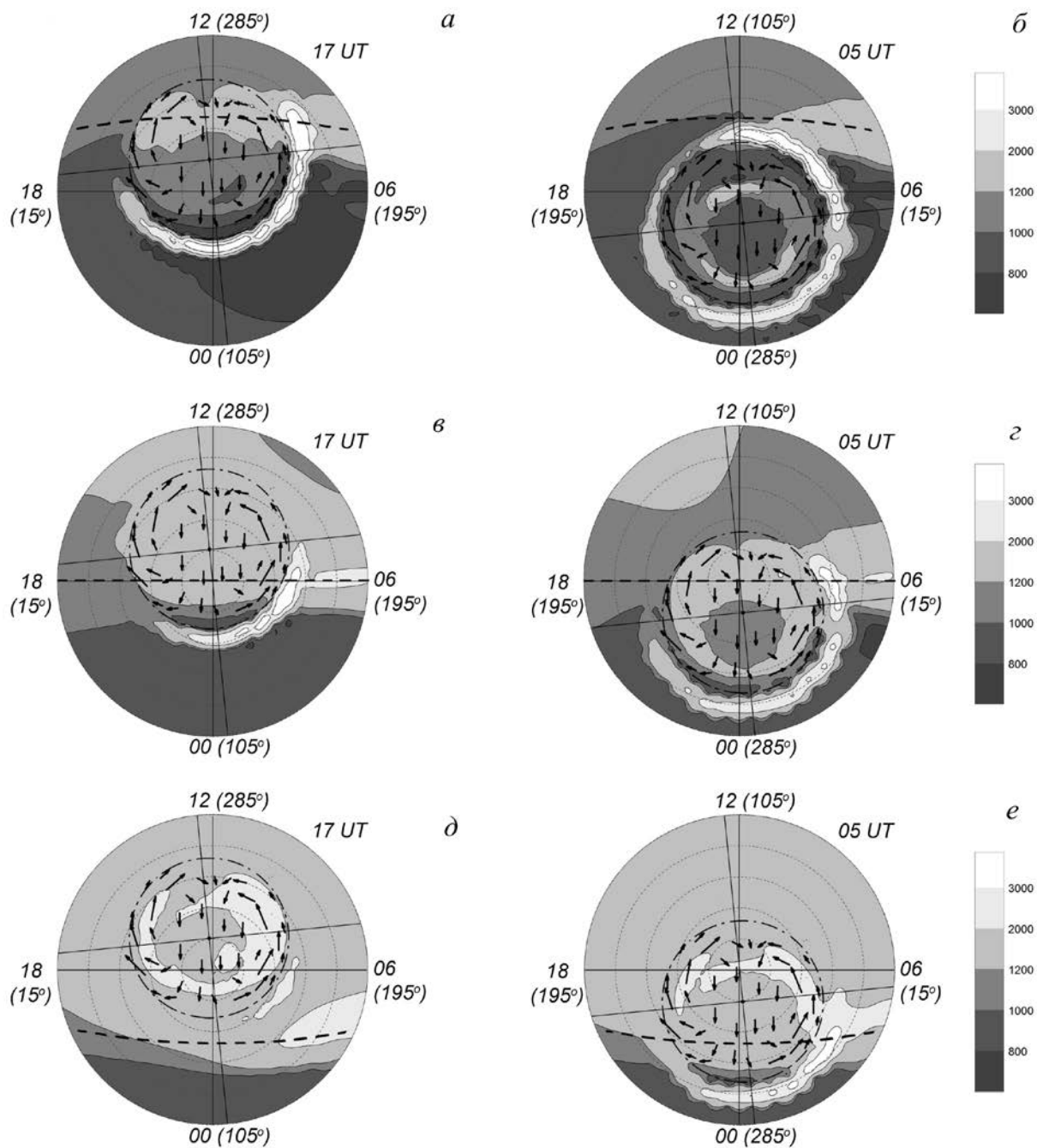


Рис. 2. Рассчитанные распределения температуры электронов (в К) на высоте 300 км в 05 и 17 UT для условий зимнего солнцестояния (а, б), весеннего равноденствия (в, в) и летнего солнцестояния (д, е)

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  $T_e$ .

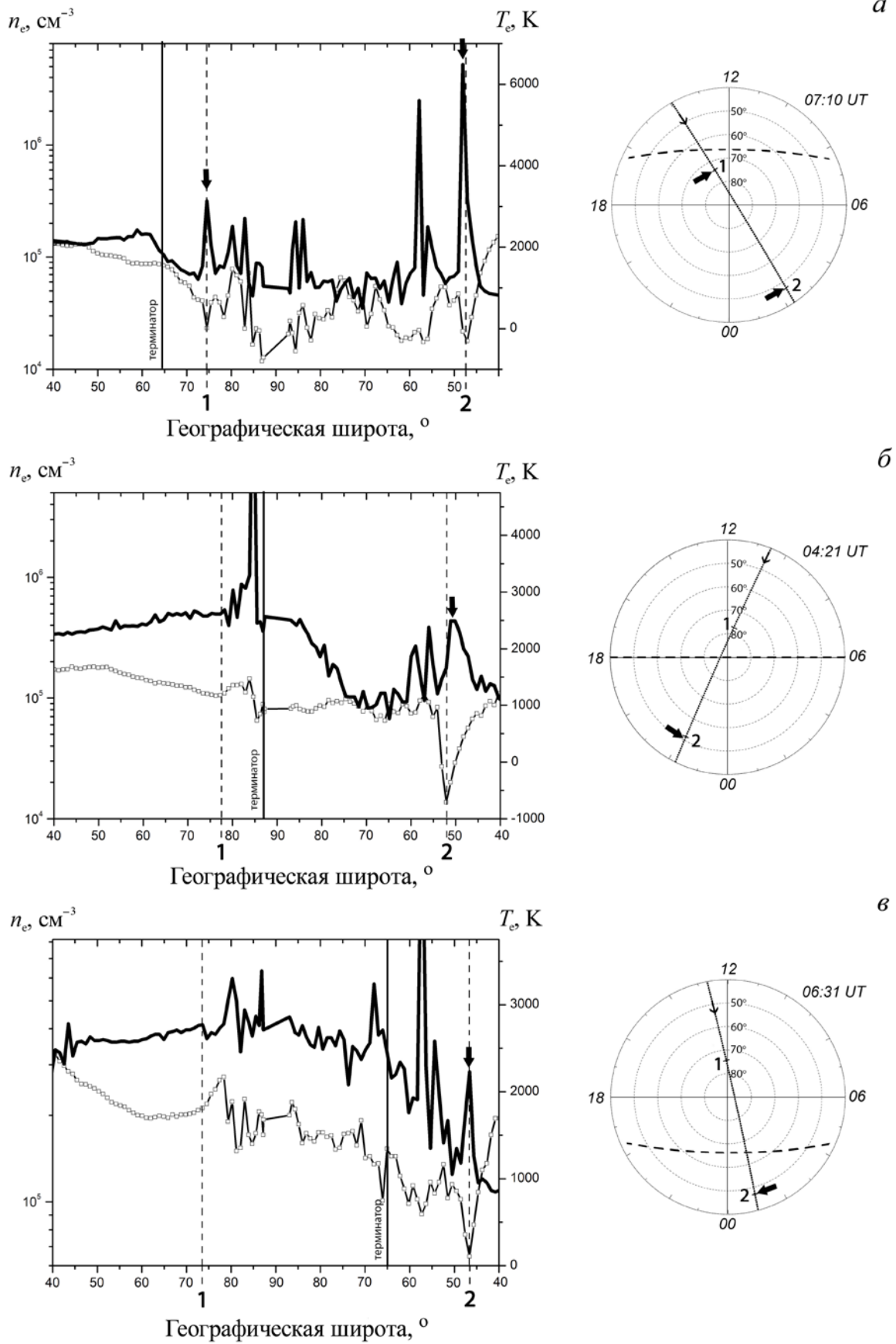


Рис. 3. Широтные профили температуры и концентрации электронов (справа) и траектории полета CHAMP (слева), полученные для зимнего (а), равноденственного (б) и летнего (в) сезонов при  $K_p \approx 3$

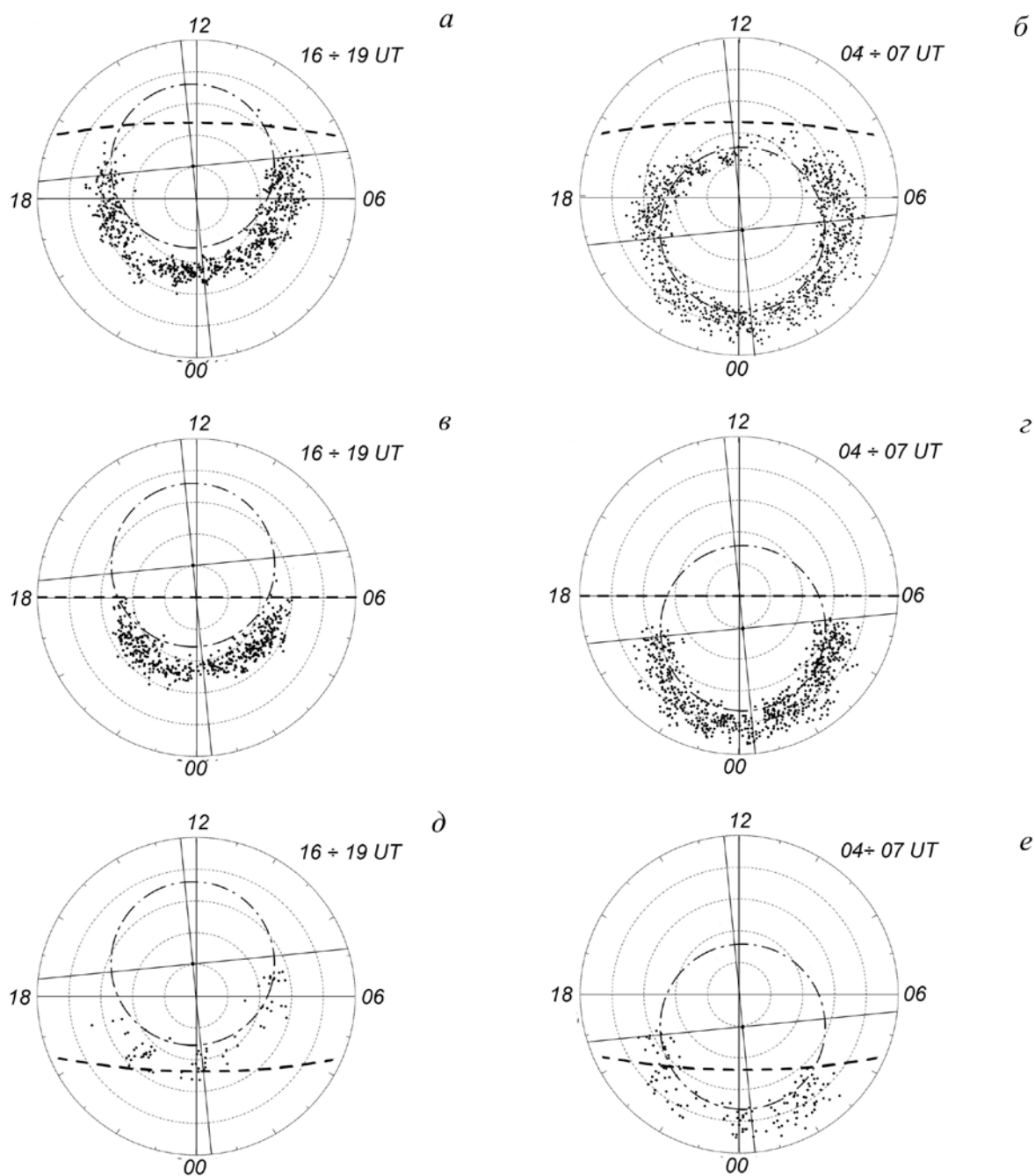


Рис. 4. Пространственное распределение пиков  $T_e$  (точки) в координатах местное время — географическая широта по данным СНАМР в интервалах 16–19 UT и 04–07 UT для зимних (а, б), равноденственных (в, г) и летних месяцев (д, е)

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 околополуденные часы (рис. 4, б).

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

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 серповидная 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 серповидной зоны;
- в равноденственный и летний периоды области повышения  $T_e$  в субавроральной ионосфере имеют вид серповидной зоны различной длины и четкости.

Работа поддержана грантом РФФИ № 18-45-140037р\_а и № 18-45-140003р\_а.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Брюнелли Б.Е., Намгалдзе 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., Намгалдзе 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).

Pröller 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).