

УДК 550.388.2

## ФОРМИРОВАНИЕ КОЛЬЦЕОБРАЗНОЙ ОБЛАСТИ ПОВЫШЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕКТРОНОВ В СУБАВРОРАЛЬНОЙ ИОНОСФЕРЕ В ЗИМНИЙ ПЕРИОД

© 2019 г. И. А. Голиков<sup>1</sup> \*, А. Ю. Гололобов<sup>2</sup> \*\*, В. И. Попов<sup>2</sup> \*\*\*, И. И. Варламов<sup>2</sup>

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

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

\*e-mail: gia2008@mail.ru

\*\*e-mail: golart87@gmail.com

\*\*\*e-mail: volts@mail.ru

Поступила в редакцию 17.12.2017 г.

После доработки 29.05.2018 г.

Принята к публикации 27.09.2018 г.

На основе сопоставления результатов численного моделирования и измерений электронной температуры ( $T_e$ ) на ИСЗ СНАМР показана возможность формирования кольцеобразной области повышения температуры электронов в субавроральной ионосфере, окружающей авроральный овал, в интервале 04–07 ч мирового времени (UT), когда высокоширотная ионосфера оказывается на ночной (затененной) стороне.

DOI: 10.1134/S0016794019020081

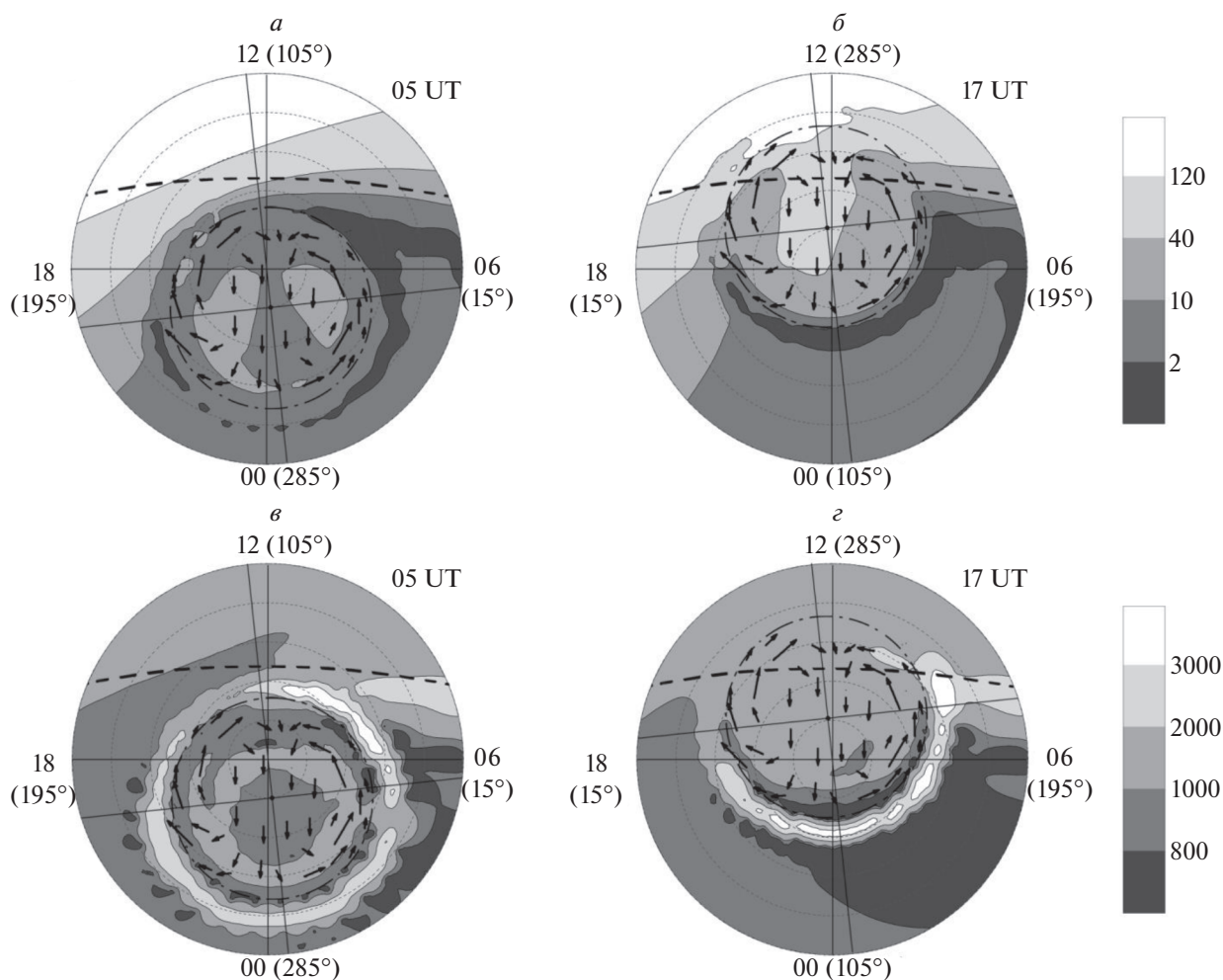
### 1. ВВЕДЕНИЕ

В работах [Brace et al., 1982; Kofman, 1984] по экспериментальным данным были обнаружены эффекты повышения температуры электронов в субавроральной ионосфере – “горячие пятна”. Численному моделированию теплового режима высокоширотной ионосферы посвящен ряд работ [Schunk et al., 1986; Клименко и др., 1991; Mingalev and Mingaleva, 2002; Pröls, 2006; David et al., 2011], где изучены причины формирования “горячих пятен”. Показано, что “горячие пятна” связаны с нисходящими потоками тепла, электрическими полями и пониженными значениями концентрации электронов  $n_e$  в области главного ионосферного провала (ГИП). Эти результаты были получены в основном для условий равенства и хорошо описывают такие структурные особенности пространственного распределения  $T_e$ , как “пятна”.

Цель настоящей работы – изучение путем сопоставления результатов численного моделирования и измерений на ИСЗ СНАМР особенностей пространственного распределения электронной температуры в области  $F$  высокоширотной ионосферы для зимних условий.

### 2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Расчеты проведены с помощью трехмерной модели высокоширотной ионосферы в эйлеровых переменных, учитывающей ее тепловой режим в интервале высот 120–500 км [Голиков и др., 2016]. Учтено несовпадение географического и геомагнитного полюсов, которое обуславливает UT-контроль параметров высокоширотной ионосферы [Гололобов и др., 2014]. На рисунке 1 приведено рассчитанное распределение концентрации  $n_e$  и температуры электронов  $T_e$  на высоте 300 км в 05 и 17 UT для условий средней солнечной активности в координатах местное время (долгота) – географическая широта. 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 даны скорости движения ионов, обусловленные электрическим полем магнитосферной конвекции. Штрихпунктирная окружность – положение плазмопаузы, которая соответствует экваториальной границе области магнитосферной конвекции по модели “А” Хеппнера [Heppner, 1977]. Для расчета скорости корпускулярной ионизации использовалась модель авроральных высыпаний



**Рис. 1.** Распределение концентрации электронов (*а, б*) (в ед.  $10^4 \text{ см}^{-3}$ ) и температуры (в К) электронов (*в, г*) на высоте 300 км в 05 и 17 UT для условий зимнего солнцестояния.

APM (Auroral Precipitation Model) [Vorobjev et al., 2013]. На высоте 500 км экваториальнее авроральных высыпаний задается нисходящий поток тепла  $P = -5 \times 10^9 \text{ эВ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  на геомагнитных широтах  $58^\circ\text{--}62^\circ \text{ N}$  [David et al., 2011], что соответствует субавроральным широтам. В 05 UT геомагнитный полюс находится вблизи полуночного меридиана, а в 17 UT – вблизи полуденного. На рисунке 1*а* видно, что в 05 UT плазмопауза и высокоширотная ионосфера находятся на ночной стороне и провал в широтном ходе  $n_e$  формируется во всех временных секторах субавроральной ионосферы экваториальнее области конвекции и высыпаний. В 17 UT часть области конвекции и высыпаний оказывается на освещенной стороне. В этот момент мирового времени провал  $n_e$  в широтном ходе, отождествляемый с ГИП согласно определению [Кринберг и Ташилин, 1984; Брюнелли и Намгаладзе, 1988], формируется только на затененной стороне (рис. 1*б*). Далее, в рассчитанном распределении  $T_e$  видно,

что в 05 UT, когда высокоширотная ионосфера находится на ночной стороне, область повышенной  $T_e$  в субавроральной ионосфере принимает кольцеобразный вид (рис. 1*в*). В 17 UT, когда часть высокоширотной ионосферы освещена, область повышенных значений  $T_e$  имеет вид серповидной зоны, совпадающей с положением ГИП в ночные часы (рис. 1*г*). В этих зонах  $T_e$  достигает  $\sim 3000 \text{ К}$  и более.

### 3. СОПОСТАВЛЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ

Для сопоставления взяты данные ИСЗ СНАМР с полярной орбитой  $87.3^\circ$  [Reigber et al., 2002]. Отличительной особенностью ИСЗ СНАМР является то, что спутник вследствие прецессии плоскости орбиты со скоростью  $\sim 1.36$  град/сут с течением времени меняет траекторию полета и может пролетать над различными временными секторами [Xiong et al., 2013]. На рисунке 2 представлены

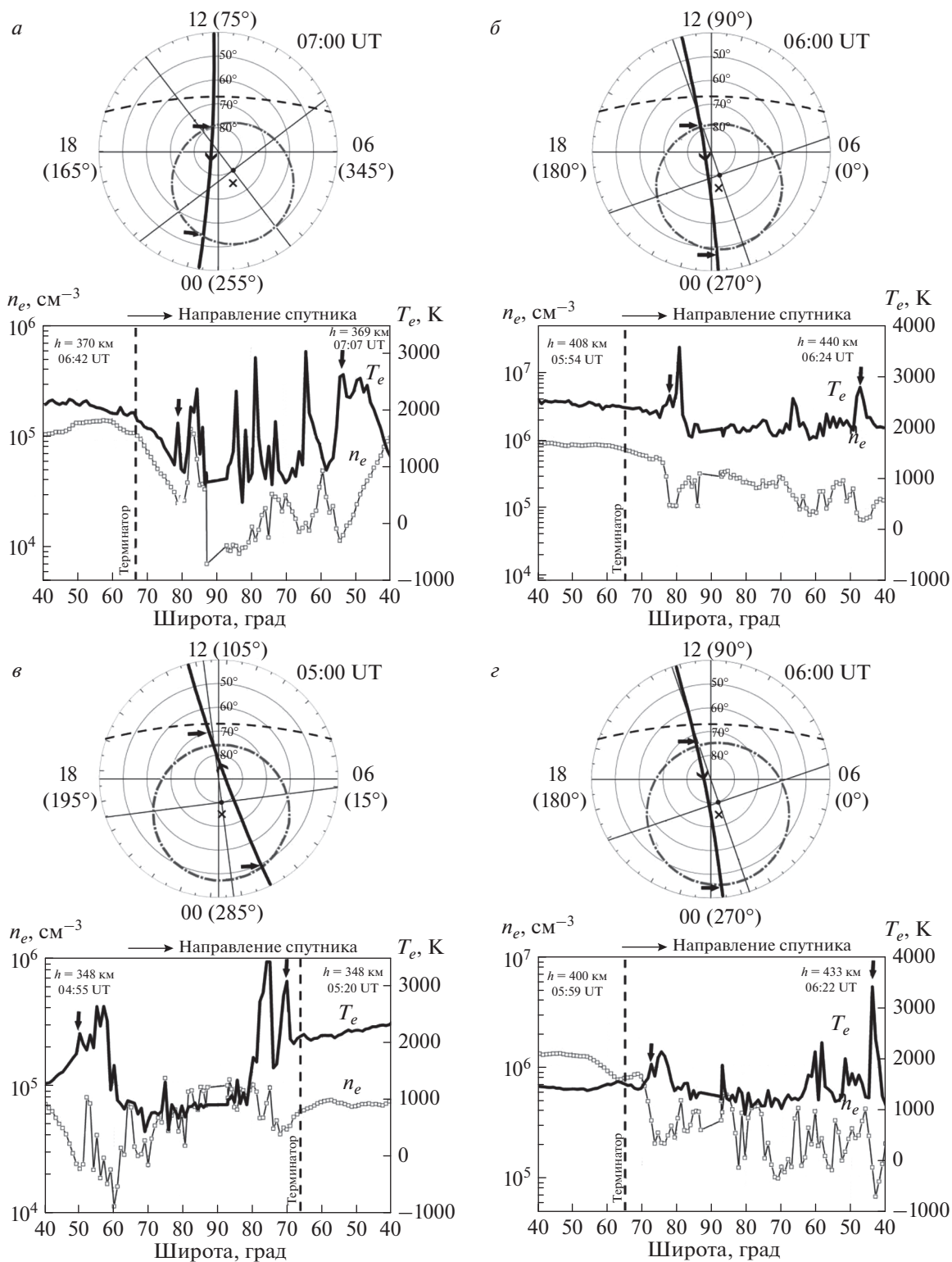


Рис. 2. Траектории полета спутника CHAMP (вверху), профили температуры и концентрации электронов (внизу) вблизи меридиональной плоскости “полдень – полночь” при  $K_p = 0$  (а),  $K_p = 3$  (б),  $K_p = 4$  (в) и  $K_p = 5$  (г).

данные измерений на ИСЗ CHAMP для зимних месяцев 2002–2009 гг. Регистрация повышений  $T_e$  (пики) вдоль траектории полета спутника в

главном ионосферном провале позволяет изучить изменения пространственной картины области повышения  $T_e$  в субавроральной ионосфере в за-

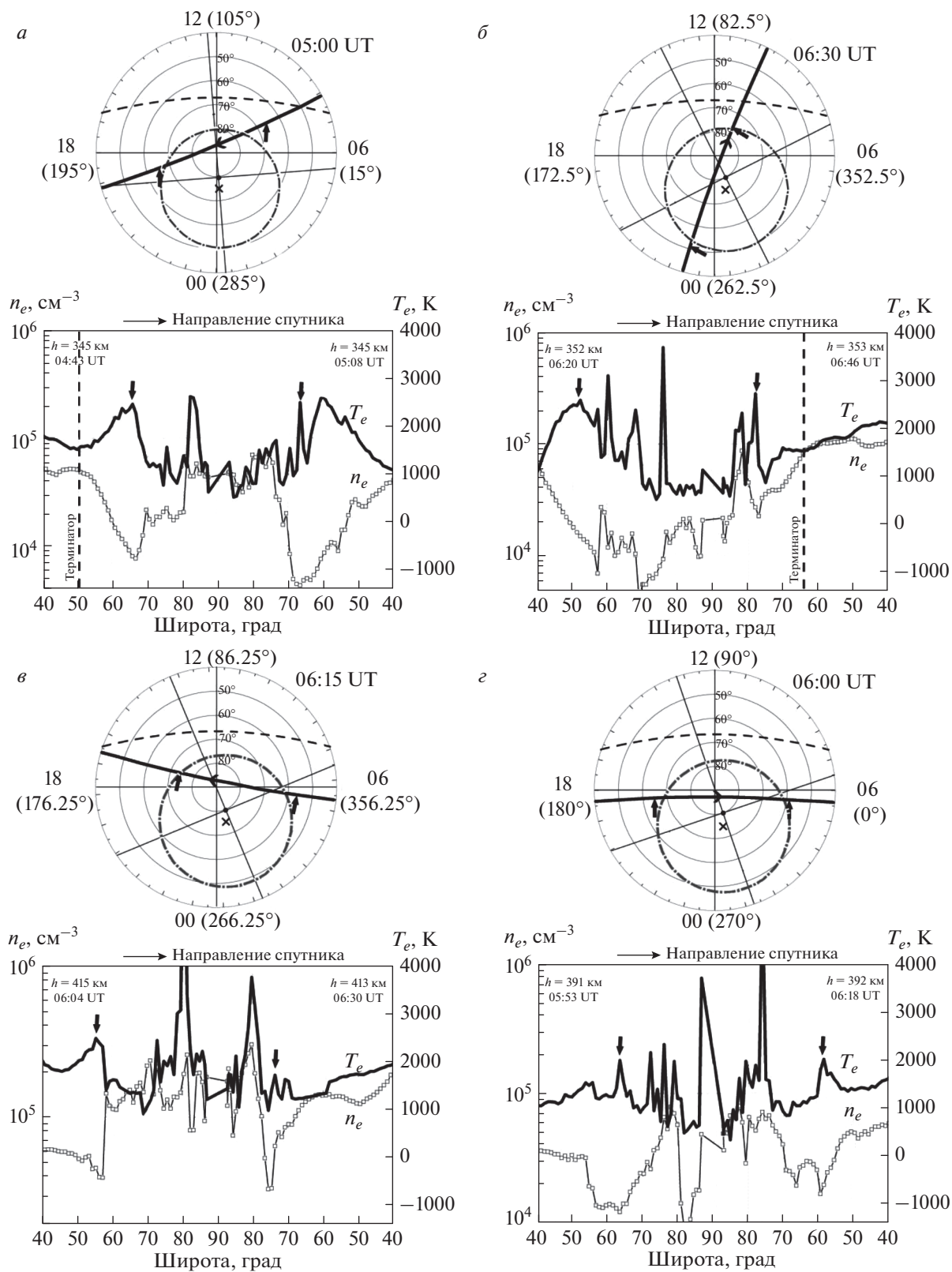
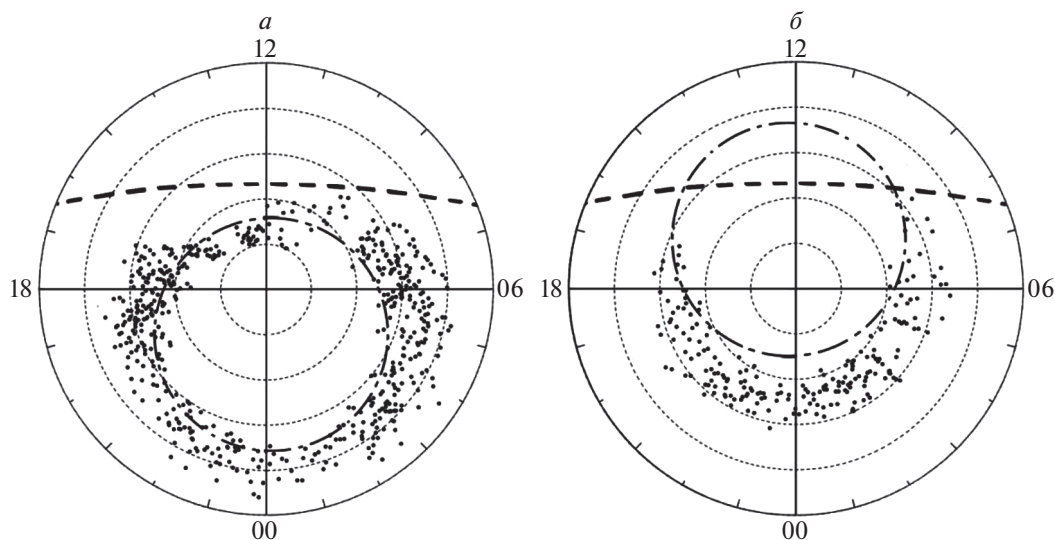


Рис. 3. Траектории полета спутника ЧАМР (вверху), профили температуры и концентрации электронов (внизу), полученные в разных временных секторах при  $K_p = 0$  (а),  $K_p = 1$  (б),  $K_p = 3$  (в, г).



**Рис. 4.** Пространственное распределение местоположений пиков  $T_e$  (точки) в координатах местное время – географическая широта по данным ИСЗ СНАМР в интервалах 04–07 UT (а) и 16–19 UT (б). Положение плазмопаузы задано по модели Хеппнера, как на рис. 1.

висимости от UT. Как видно на рис. 2а, спутник пролетает близко к меридиональной плоскости “полдень–полночь”. Штрихпунктирной кривой показано положение плазмопаузы по Liu and Liu [2014]. Для учета асимметрии плазмопаузы аналогично выводам, из работы [Sojka et al., 1979] центр плазмопаузы (крестик) смещен на  $5^\circ$  в антисолнечном направлении относительно геомагнитного полюса (жирная точка). Траектория полета спутника показана жирной линией, а стрелка на линии указывает направление движения спутника. Отдельными стрелками показаны положения пиков  $T_e$ , совпадающие с областью понижения электронной концентрации. На рисунке 2а видно, что в широтном ходе  $n_e$  в полуденном секторе под терминатором концентрация электронов начинает резко падать вследствие отсутствия эффективных источников ионизации, образуя дневной провал ( $\sim 78^\circ$  N). На ночной стороне ГИП располагается на широтах ниже ( $\sim 54^\circ$  N). В этих временных секторах формируются области повышенных  $T_e$ , пространственно совпадающие с дневным провалом и ГИП. Повышение  $T_e$  в полуденном секторе составляет  $\Delta T_e \approx 600$  K относительно фонового, и  $\Delta T_e \approx 1200$  K на ночной стороне. Видно, что с повышением уровня геомагнитной активности положение пиков смещается в экваториальном направлении (рис. 2б, 2в, 2г).

Рассмотрим измеренные профили  $T_e$  и  $n_e$ , полученные на ИСЗ СНАМР вдоль траекторий полета спутника, пересекающих другие временные сектора (рис. 3). При пролете спутника около меридиональной плоскости “утро–вечер” (рис. 3а) пики  $T_e$  регистрируются в вечернем ( $\sim 67^\circ$  N) и

утреннем ( $\sim 65^\circ$  N) секторах вблизи плазмопаузы, где наблюдается ГИП. На рисунке 3б спутник пролетает через предполуночный и предполуденный сектора. Видно, что в обоих секторах также наблюдаются пики  $T_e$ . Причем положение предполуденного пика находится на высоких широтах ( $\sim 77^\circ$  N), а предполуночный пик наблюдается на широтах ниже  $\sim 52^\circ$  N. Подобные ситуации наблюдаются и на рис. 3в и 3г.

На рисунке 4 представлено пространственное распределение местоположений пиков  $T_e$  (точки) в координатах местное время – географическая широта по данным ИСЗ СНАМР. Рассмотрены траектории полета спутника, пересекающие субавроральную ионосферу в интервале 04–07 UT (рис. 4а) и 16–19 UT (рис. 4б). Как видно на рис. 4а, пики  $T_e$  пространственно образуют кольцеобразную область, а на рис. 4б – область в виде серпа, что согласуется с результатами численных расчетов (рис. 1). Для интервала 04–07 UT всего было рассмотрено 356 пролетов с регистрацией пиков  $T_e$ , из которых 254 – с двумя пиками вдоль одной траектории, как на рис. 2 и 3.

Отметим, что специфичность спутниковых измерений не дает мгновенную картину распределения  $T_e$  в высокоширотной ионосфере, как в случае модельных расчетов. Поэтому приходится использовать для сопоставления обобщенные результаты измерений за длительный период. В дальнейших исследованиях будут привлечены изображения, полученные с высокоорбитальных спутников на длине волны  $\lambda = 630$  нм, глобальной картины пространственного распределения красных дуг, возникающих в субавроральной ионо-



сфере в результате влияния кольцевого тока. Как известно, в области красных дуг  $T_e$  повышена [Maier et al., 1975].

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на основе сопоставления результатов модельных расчетов и данных измерений  $T_e$ , полученных на ИСЗ CHAMP, можно сделать вывод о том, что зимой в интервале 04–07 UT в условиях притока тепла из магнитосферы можно ожидать формирования кольцеобразной области в субавроральной ионосфере, окружающей авроральный овал, где температура электронов значительно выше фоновой ( $T_e \geq 2000$  К). Это связано с тем, что в данном интервале мирового времени высокоширотная ионосфера, включая субавроральную, в ходе суточного вращения Земли вокруг своей оси оказывается на ночной (затененной) стороне с образованием области пониженных значений электронной концентрации во всей субавроральной ионосфере в глобальном масштабе, где и происходит повышение  $T_e$  вследствие притока тепла сверху.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты № 15-45-05090-р\_восток\_a и 15-45-05066-р\_восток\_a.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука, 527 с. 1988.
- 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. Т. 2. № 4. С. 54–62. 2016.
- Гололобов А.Ю., Голиков И.А., Попов В.И. Моделирование высокоширотной ионосферы с учетом несовпадения географического и геомагнитного полюсов // Вестн. Северо-Восточного федерального ун-та. Т. 11. № 2. С. 46–54. 2014.
- Клименко В.В., Кореньков Ю.Н., Намгаладзе А.А., Карпов И.В., Суроткин В.А., Наумова Н.М. Численное моделирование “горячих пятен” в ионосфере Земли // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 31. № 3. С. 554–557. 1991.
- Кринберг И.А., Таццилин А.В. Ионосфера и плазмосфера. М.: Наука, 189 с. 1984.
- 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. V. 9. № 9. P. 989–992. 1982.
- 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. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 73. № 5. P. 2399–2409. 2011.08.009. 2011. doi 10.1016/j.jastp
- Heppner J.P. Empirical model of high electric field // J. Geophys. Res. V. 82. № 7. P. 1115–1125. 1977.
- Kofman W. Very high electron temperature in the daytime F region at Sondrestrom // Geophys. Res. Lett. V. 1. № 9. P. 912–922. 1984.
- Maier E.J., Chandra S., Brace L., Hoffman J.H., Shepherd G.G., Whitteker J.H. The SAR arc event observed during the December 1971 magnetic storm // J. Geophys. Res. V. 80. № 34. P. 4591–4597. 1975.
- Mingalev G.I., Mingaleva V.S. Simulation of the spatial structure of the high-latitude F-region for different conditions of solar illumination of the ionosphere / Proc. 25 th Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena”. Apatity, Russia, February 26–March 1, 2002. P. 107–110. 2002.
- Liu X., Liu W. A new plasmopause location model based on THEMIS observations // Science China. Earth Sciences. V. 57. P. 2552–2557. 2014. doi 10.1007/s11430-014-4844-1
- Prölss G.W. Ionospheric F-region storms: Unsolved problems / Characterising the Ionosphere. Meeting Proceedings. RTO-MP-IST-056. Paper 10. Neuilly-sur-Seine, France: RTO. P. 10-1–10-20. 2006.
- Reigber C., Lühr H., Schwintzer P. CHAMP mission status // Adv. Space Res. V. 30. P. 129–134. 2002.
- Sojka J.J., Raitt W.J., Schunk R.W. Effect of displaced geomagnetic and geographic poles on high-latitude plasma convection and ionospheric depletion // J. Geophys. Res. V. 84. № 10. P. 5943–5951. 1979.
- 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. V. 91. № 91. P. 12041–12054. 1986.
- Vorobjev V.G., Yagodkina O.I., Katkalov Yu.V. Auroral Precipitation Model and its application to ionospheric and magnetospheric studies // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 102. P. 157–171. 2013. doi 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. V. 51. № 4. P. 536–544. 2013. doi 10.1016/j.asr.2011.09.021