

УДК 550.388.2

ДОЛГОТНЫЕ ВАРИАЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕКТРОНОВ СУБАВРОРАЛЬНОЙ ИОНОСФЕРЫ

Деминев М. Г., Карпачев А. Т., Афонин В. В.,
Харьков И. П., Шмилауэр Я.

В связи с обнаруженным сильным долготным контролем положения главного ионосферного провала (ГИП) в электронной концентрации N_e по данным ИСЗ «Интеркосмос-19» проведен анализ долготных изменений основных характерных структур температуры электронов T_e субавроральной околополуночной, зимней, спокойной ионосферы обоих полушарий периода высокой солнечной активности. Обнаружено, что положение минимума ГИП и субаврорального пика T_e практически совпадают на всех долготах. Дано обсуждение этого явления. Экваториальнее этого пика выделен дополнительный максимум T_e , положение которого не зависит от долготы. Приведены аргументы в пользу связи этого максимума с остаточным кольцевым током предшествующей бури.

Введение. Для понимания природы долготных изменений ионосферы целесообразно исследование не только электронной концентрации [1], но и температуры электронов. В ночных условиях температура электронов в ионосфере T_e растет к высоким широтам. Последнее связано с тем, что с увеличением широты растет объем геомагнитных силовых трубок и, как следствие, увеличивается плазмосферный резервуар тепловой энергии, усиливается захват фотоэлектронов геомагнитным полем и возрастает скорость нагрева плазмосферы (см., например, [2]). На это увеличение T_e накладываются более резкие пики температуры электронов, один из которых расположен примерно в области главного ионосферного провала (ГИП). Считается, что этот пик связан с локальным уменьшением скорости охлаждения электронов из-за уменьшения электронной концентрации в области ГИП [3, 4] и с передачей тепла из магнитосферы из-за взаимодействия горячих частиц кольцевого тока с фоновой плазмой вблизи плазмопаузы через кулоновское рассеяние и перезарядку [5] или в результате ионно-циклотронной неустойчивости [6]. В связи с этим попытки анализа взаимного широтного расположения минимума ГИП в электронной концентрации, пика T_e , плазмопаузы и кольцевого тока предпринимались неоднократно [3, 4, 7–10]. Тем не менее природа этого пика T_e до сих пор окончательно не установлена. Дополнительную информацию об энергетике ионосферы и магнитосферы может дать анализ долготных изменений характерных структур температуры электронов. Целесообразность таких исследований связана с обнаруженным ранее по данным ИСЗ «Интеркосмос-19» (ИК-19) фактом сильных долготных изменений положения ГИП — до $10\text{--}11^\circ$ инвариантной широты в околополуночной зимней спокойной ионосфере [1].

Цель данной работы — исследовать долготные изменения характерных структур (пигов) температуры электронов и их связь с ГИП в околополуночной зимней спокойной ионосфере периода высокой солнечной активности, используя для этого данные ИСЗ ИК-19.

Результаты наблюдений. Под долготным контролем ионосферы в данном случае понимаются изменения характерных структурных особенностей концентрации и температуры электронов в ионосфере с долготой для фиксированного локального времени, широты, сезона, уровней солнечной

ч магнитной активности. Данные о главном ионосферном провале были получены с помощью станции внешнего зондирования как на высоте ИСЗ (~600–800 км), так и на высоте максимума области F2. Поскольку положения провала в обоих случаях не слишком сильно различались, ниже рассмотрен провал только в f_oF2 (или N_mF2) и принято обозначение $N_e = N_mF2$. Данные по T_e получены с помощью прибора КМ-3 [4] вдоль траектории ИСЗ. Для анализа использованы данные ИК-19, относящиеся к околополуночным (22–02 LT) часам местного времени 12–19.II 1980 г. для северного и 15–17.VIII 1979 г. для южного полушария. В северном полушарии наблюдения проводились через 3 сут после магнитного возмущения с максимальным значением $K_p=7_-$, а в южном — через 2 сут после $K_p=7_+$, однако сам период наблюдений и предшествующие сутки до него характеризовались очень спокойной геомагнитной обстановкой ($\Sigma K_p \leq 13_+$). Отметим, что в эпоху высокой солнечной активности очень спокойные ($K_p \leq 2$) периоды более трех суток не наблюдаются.

На рис. 1 приведен пример изменений N_e и T_e с инвариантной широтой Φ' в южном полушарии на четырех последовательных витках ИК-19 16.VIII 1979 г. (географическая долгота λ соответствует $\Phi'=60^\circ$). Из рис. 1 видно, что по мере движения к высоким широтам вблизи $\Phi'=55^\circ$ наблюдается небольшой пик T_e , с которым связано слабое уменьшение N_e . Назовем его среднеширотным пиком. Он не всегда отчетливо фиксируется. Примерно в области минимума ГИП практически всегда наблюдается довольно четко выраженный пик T_e . Назовем его субавроральным пиком. Видно, что положение среднеширотного пика T_e слабо зависит от долготы. Положение субаврорального пика, так же как и минимума ГИП в N_e , зависит от долготы. Поэтому на долготах, где ГИП расположен на относительно низких широтах, положения среднеширотного и субаврорального пиков практически совпадают и их нельзя различить. С полярной стенкой ГИП может быть связано резкое увеличение T_e к высоким широтам. Ниже рассмотрены изменения с долготой экваториальной границы резкого увеличения N_e — полярной стенки ГИП и экваториальной границы резкого увеличения T_e вблизи этой стенки. Из рис. 1 видно, что экваториальную границу увеличения T_e не всегда можно определить однозначно. Так, на $\lambda=60^\circ$ вблизи стенки ГИП наблюдается слабый максимум и последующий резкий рост T_e . Что касается полярной стенки, то она также не всегда определяется достаточно однозначно из-за сильной диффузности ионограмм внешнего зондирования. Поэтому к данным о положениях этих структур следует относиться как к ориентировочным. Тем не менее долготная зависимость положения стенки ГИП и начала роста T_e вблизи этой стенки видна из рис. 1 достаточно отчетливо.

На рис. 2 для указанных выше периодов наблюдений приведены изменения с географической долготой положения: 1) экваториальной границы полярной стенки ГИП в N_e , 2) начала резкого роста T_e к высоким широтам вблизи полярной стенки ГИП, 3) минимума ГИП в N_e , 4) субаврорального пика T_e , 5) среднеширотного пика T_e . Точки относятся к N_e , кружки — к T_e . Средние положения минимума ГИП, экваториальной границы его полярной стенки и среднеширотного пика T_e нанесены штриховыми линиями. Положение слабого минимума N_e вблизи среднеширотного пика T_e не приведено, поскольку оно практически не отличается от положения последнего. Видно, что положение среднеширотного пика T_e практически не зависит от долготы. Несмотря на разницу в половину года между периодами наблюдений в северном и южном полушариях, положения среднеширотного пика T_e в обоих полушариях практически совпадают. Долготные изменения субаврорального пика T_e отслеживают долготные изменения положения минимума ГИП в N_e с амплитудой (разница между максимальным и минимальным значением широты пика T_e) $\Phi' \sim 10^\circ$ в обоих полушариях. Аналогично изменяются экваториальная граница полярной стенки ГИП и начало роста T_e к высоким широтам вблизи полярной стенки ГИП.

Положение начала резкого роста T_e к высоким широтам вблизи полярной стенки ГИП отслеживает изменение положения экваториальной гра-

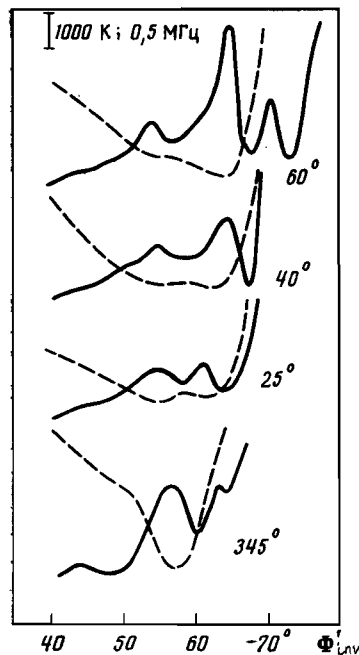


Рис. 1

Рис. 1. Пример широтных изменений T_e (сплошные линии) и N_e (штриховые) для четырех последовательных пролетов ИК-19 в южном полушарии 16.VIII 1979 г. Географические долготы указаны для широты $\Phi' = 60^\circ$. Местное время 22-02 LT, $K_p \leq 2$

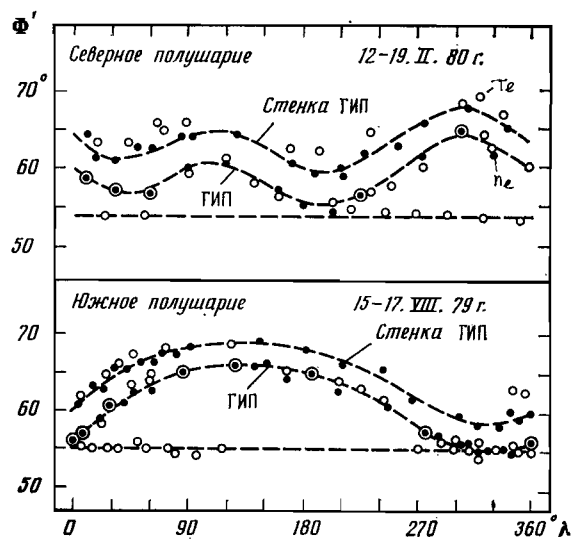


Рис. 2

Рис. 2. Изменения с географической долготой положения основных структур в N_e (точки) и T_e (кружки) ночной субарктической ионосферы: минимума ГИП в N_e и основания его полярной стенки; среднеширотного и субарктического пиков T_e , а также экваториальной границы резкого увеличения T_e вблизи полярной стенки ГИП. Средние положения минимума ГИП, его полярной стенки и среднеширотного пика T_e нанесены штриховыми линиями. Местное время 22-02 LT, $K_p \leq 2$

ницы полярной стенки ГИП в N_e , но с меньшей амплитудой — $\Phi' \sim 6^\circ$ для T_e и $\Phi' \sim 10^\circ$ для N_e для обоих полушарий.

Из рис. 2 следует еще одна характерная особенность: долготные изменения минимума и полярной стенки ГИП имеют суточный и полусуточный период по мировому времени для южного и северного полушарий соответственно.

Обсуждение. Приведем краткий анализ возможных механизмов образования перечисленных выше особенностей широтного хода T_e и их долготных изменений.

Среднеширотный пик T_e , по-видимому, связан с захваченными ионами кольцевого тока, инжектированными в предшествующую бурю на относительно низкие L -оболочки [8]. Возможный механизм передачи энергии в ионосферу — перезарядка и, возможно, кулоновское рассеяние ионов остаточного кольцевого тока. Этот вывод основан на следующем. Положение среднеширотного пика T_e не зависит от долготы и оно одинаково в двух независимых событиях, отличающихся на полгода. Величина среднеширотного пика T_e в общем отрицательно коррелирует с N_e (см. также рис. 1) из-за изменения скорости локального охлаждения электронов, поэтому величина потока тепла в ионосферу из области остаточного кольцевого тока слабо зависит от долготы. Среднеширотный пик T_e не наблюдается в конце очень длительных спокойных периодов.

Начало резкого роста температуры электронов вблизи полюсной стенки ГИП, по-видимому, связано с экваториальной границей высыпания электронов из плазменного слоя [3]. Долготные изменения этой границы высыпания, как было предсказано в [1], зависят главным образом от долготных изменений модуля магнитного поля. По-видимому, приведенный в [11] УТ-контроль экваториальной границы высыпаний электронов связан

именно с этой причиной. Однако, как отмечалось выше, к характеристикам N_e и T_e у полярной стенки ГИП следует относиться как к ориентировочным.

Величина субаврорального пика T_e в общем больше, когда ГИП расположен на относительно высоких широтах. Локализация пика T_e частично может быть связана с уменьшением N_e в области ГИП и, как следствие, уменьшением скорости локального охлаждения. Этот процесс приведет к совпадению положения субаврорального пика T_e и минимума ГИП в N_e , а также к дополнительному росту T_e , что совпадает с результатами наблюдений (см. рис. 2). Долготные изменения положения минимума ГИП проанализированы в [1]. Было показано, что они примерно в равной степени определяются несовпадением географического и геомагнитного полюсов (УТ-контроль) и параметрами магнитного поля Земли — модулем, наклоном и наклонением (долготный эффект), что приводит к долготным изменениям вклада нейтральной атмосферы и электрического поля магнитосферной конвекции в формирование ГИП. Поэтому долготные изменения положения субаврорального пика температуры частично связаны с этими же причинами. Однако учета локального охлаждения электронов явно недостаточно даже для качественного объяснения природы субаврорального пика. Так, этими механизмами трудно объяснить резкое уменьшение T_e к полюсу от минимума ГИП. По-видимому, важен дополнительный учет процессов взаимодействия горячих частиц кольцевого тока с фоновой плазмой вблизи плазмопаузы. Если этот процесс действительно важен, то независимо от природы взаимодействия горячих и холодных частиц положение плазмопаузы должно зависеть от долготы, как было предсказано в [1]. По-видимому, амплитуда долготных изменений положения плазмопаузы в экваториальной плоскости меньше, чем амплитуда долготных изменений положения минимума ГИП и субаврорального пика T_e . Последнее в данном случае связано с тем, что на долготах максимального смещения ГИП к экватору, по-видимому, должно наблюдаться увеличение электрического поля конвекции на субавроральных широтах [1], что может объяснить снос потока энергии на соседние L -оболочки относительно источника [8]. Из двух рассматриваемых периодов (зима, лето) долготные изменения положения плазмопаузы, по-видимому, наиболее заметны в летние месяцы, когда слабо освещено южное полушарие [1].

ЛИТЕРАТУРА

1. Деминов М. Г., Карпачев А. Т. // Геомагнетизм и аэронавигация. 1986. Т. 26. С. 63.
2. Кринберг И. А., Тацилин А. В. Ионосфера и плазмосфера. М.: Наука, 1984. 189 с.
3. Brinton H. C., Grebowsky J. M., Brace L. H. // J. Geophys. Res. 1978. V. 83. P. 4767.
4. Шмиллауэр Я., Афонин В. В. // Физические процессы в области главного ионосферного провала. Прага: 1983, с. 189.
5. Cole K. D. // J. Geophys. Res. 1965. V. 70. P. 1689.
6. Cornwall J. M., Coroniti F. V., Thorne K. M. // J. Geophys. Res. 1971. V. 76. P. 2248.
7. Brace L. H., Theis R. F. // J. Geophys. Res. 1974. V. 79. P. 1871.
8. Burke W. J., Braun H. J., Munch J. W., Sagalyn R. C. // Planet. Space Sci. 1979. V. 27. P. 1175.
9. Shepherd G. G., Brace L. H. et al. // Planet. Space Sci. 1980. V. 28. P. 69.
10. Afonin V. V., Kubat K., Smirnova N. F., Smilauer Ja. Report UAG-83. 1982. P. 201.
11. Meng C.-I. // J. Geophys. Res. 1979. V. 84. P. 5319.

Институт земного магнетизма, ионосферы
и распространения радиоволн АН СССР
Институт космических исследований АН СССР
Геофизический институт Чехословацкой
Академии наук
Прага

Поступила в редакцию
17.VI.1986