

есть English

УДК 550.388.2

© 1998 г. Шестакова Л.В., Афонин В.В., Халипов В.Л.,
Степанов А.Е., Зикрач Э.К.

ОСОБЕННОСТИ ВЫСОКОШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ В ПОЛУДЕННЫЕ ЧАСЫ ВО ВРЕМЯ ВОЗМУЩЕНИЯ 29 АВГУСТА 1979 г.

Изучена динамика провала в области клефта/каспа в околополуденные часы по одновременным измерениям со спутников DMSP F_2 , F_4 , Космос-900 и наземной ионосферной станции Тикси, оснащенной антенной системой для наклонного зондирования, во время возмущения 29 августа 1979 г. Показано, что дневные провалы электронной плотности локализованы на $2-4^\circ$ экваториальнее каспа.

Введение

Процессы в области каспа играют основополагающую роль в физике высокоширотной ионосферы. Первые экспериментальные результаты, которые показали прямое проникновение горячей плазмы из магнитослоя дневной магнитосферы на ионосферные высоты, получены на спутнике Injun-5 [1] и ISIS [2]. В последующем были выполнены спутниковые и наземные исследования локализации каспа, а также характеристик частиц, полей и токов в каспе [3-10].

По этим данным в спокойных геомагнитных условиях область дневного каспа располагается в секторе местного магнитного полудня на инвариантных широтах $75^\circ < IL < 80^\circ$. При этом ширина каспа колеблется от 1 до 3° по широте, а в долготном протяжении может простирается от 1 до нескольких часов MLT по обеим сторонам полуденного меридиана. Провалы ионизации в широтном ходе электронной концентрации в дневном секторе (08.00-16.00 MLT) были впервые обнаружены при внешнем зондировании ионосферы [11-13], а затем подтверждены наземными исследованиями [14].

В настоящей работе анализируются результаты прямых измерений ионной концентрации ($N_i = N_e$) и электронной температуры (T_e) со спутника Космос-900 (К-900) и синхронных измерений каспа со спутников DMSP во время мировой магнитной бури 29 августа 1979 г. В работе также используются данные по регистрации наземных наклонных радиоотражений от резких широтных градиентов электронной концентрации на границе каспа для анализируемого интервала времени. Следует отметить, что в работе под термином "касп" подразумевается более обширная область, обозначаемая в литературе как касп/клефт [6].

Результаты анализа

Как показывают исследования, проведенные нами по данным измерений спутника К-900, дневные провалы – это устойчивые образования и наблюдаются независимо от сезона года. Спутник К-900 имел почти круговую орбиту с высотой 500 км, периодом обращения 94.4 мин и наклоном 83° [15]. За период работы спутника с марта 1977 г. по август 1979 г., для анализа были отобраны 127 дневных широтных профиля в северном полушарии, в разные сезоны года и в разных условиях магнитной активности. В зимние и равноденственные сезоны дневные провалы четко выражены и регулярно наблюдаются на широтных профилях N_e . Летом в дневные часы они выражены менее четко и в магнитоспокойных условиях не обнаруживаются на широтных профилях.

Во время развития мировой магнитной бури 29 августа 1979 г. спутник К-900 и спутники DMSP F_2 и F_4 провели серию одновременных последовательных измерений в близких секторах MLT. Такие ситуационные наблюдения весьма редки и представляют большой интерес в интерпретации экспериментальных данных по широтному ходу N_e в дневном секторе. На рис. 1 показана широтная динамика экваториальной границы полярного каспа по данным спутников DMSP F_2 и F_4 [16]. На этом же рисунке утолщенной линией нанесены геомагнитные широты границы наклонных радиоотражений, рассчитанных по модели [17], по данным ионозонда ст. Тикси ($\Phi' = 65,5^\circ$), работавшего в стандартном 15-ти минутном режиме. Как видно, движение каспа к экватору началось с появлением отрицательной компоненты B_z ММП. На протяжении отдельных периодов времени широта каспа достигала $\Phi' = 65^\circ$. Данные о широте каспа бы-

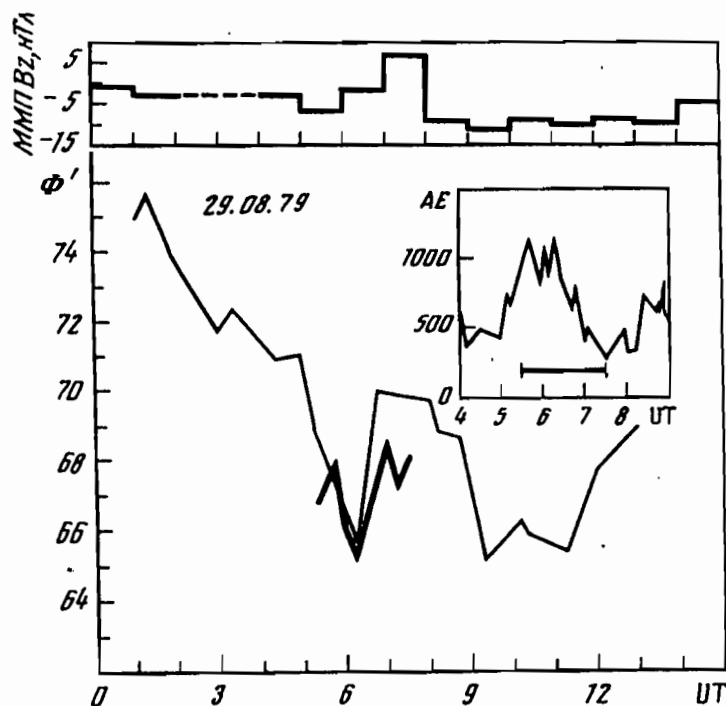


Рис. 1. Положение экваториальной границы каспа по измерениям спутников DMSP в ходе развития мировой магнитной бури 29.08.79 г. Часовые значения B_z ММП приведены вверху рисунка. Врезка вверху справа показывает вариации АЕ-индекса. Утолщенной линией нанесены широтные положения границы наклонных радиоотражений по данным ионозонда Тикси

ли нанесены стрелками на серию последовательных профилей N_e и T_e , измеренных спутником К-900 (рис. 2 а, б, в, г). Орбиты спутников DMSP располагались вблизи сектора 12.00 MLT, и сравнение данных двух спутников по MLT соответствует пространственной разнице по меридианам измерений.

Из рис. 2а видно, что в 01.36 UT минимум дневного провала локализован на $\Phi' \sim 76,5^\circ$. Через полтора часа (рис. 2б) при пролете спутника в дополуденном секторе провал сместился к экватору; наблюдаются два максимума T_e : один в области провала, другой на широтах каспа.

В период времени между 05.00–06.00 UT произошло резкое возрастание южной компоненты ММП и касп сместился до геомагнитной широты 65° (см. рис. 1). Как видно из рис. 2в его широтная протяженность в это время составляет около 2° . В соответствии с перемещением каспа наблюдаются смещения к экватору и соответствующих ионосферных структур. Электронная температура возрастает до 4800–5000 °К, а N_e повышена в несколько раз относительно ее уровня в дневном провале. В 01.36 UT и 06.08 UT (рис. 2а, в) граница каспа и подъемов N_e и T_e несколько не совпадают, что вызвано разницей по MLT в положении двух спутников. Таким образом, узкие и хорошо выраженные пики в электронной концентрации и температуре по своему положению и широтной протяженности представляют из себя признак дневного полярного каспа в области его проекции на ионосферные высоты.

В 08.00 UT произошло изменение компоненты B_z ММП с $B_z = 7$ нТл до $B_z = -10$ нТл и стала развиваться основная фаза магнитной бури. На рис. 2г видно, что максимум T_e и полярный пик ионизации локализованы вблизи каспа. Электронная температура повышена не только в каспе и над провалом, но и на средних широтах примерно на 1000°К относительно ее уровня перед началом возмущения. Анализ последующих пролетов показывает, что уровень ионизации на средних широтах в утреннем секторе оказывается заметно пониженным, в то время как в вечернем секторе MLT на средних широтах T_e остается на невозмущенном уровне, а N_e даже несколько повысилась. Это свидетельствует о том, что возмущение распространилось глубоко во внутреннюю магнитосферу только в утреннем секторе.

Обсуждение результатов

Комплексные измерения, выполненные спутниками K-900, DMSP, а также методом наземного ионосферного радиозондирования в ходе развития магнитной бури 29 августа 1979 г. позволили с разных сторон рассмотреть изменения структуры ионосферы в области дневного полярного каспа. Вторгающиеся в области дневного полярного каспа/клефта потоки электронов с интенсивностью $J = 10^9$ эл/см² с кэВ создают полярные пики в широтном ходе N_e и T_e , в которых электронная плотность возрастает в несколько раз относительно фонового уровня дневного провала, а электронная температура достигает $4-5 \cdot 10^3$ °К. Это хорошо прослеживается по данным, приведенным на рис. 2а, б, в, г. Широтные смещения каспа связаны с B_z ММП и при $B_z = -10$ нТл касп кратковременно может смещаться до $\Phi' = 65^\circ$, а его широтная протяженность уменьшается до $1-2^\circ$.

Если оценивать относительную важность процессов ионизации и потерь, то надо отметить, что широтные профили N_e в дневном секторе демонстрируют протяженную область резко пониженной электронной плотности размерами $5-10^\circ$, в которую вкраплен ионосферный касп. Такую же широтную протяженность имеет и область повышенной T_e . Этот подъем T_e вне каспа, вызван разогревом электрическим полем в области быстрой конвекции. Такой резкий рост T_e приводит, во-первых, к значительному ускорению процессов рекомбинации, во-вторых, к продольным потокам ионов из области максимума F -слоя в открытые силовые трубки. Если сравнить профили N_e в рис. 2а и рис. 2г, то электронная плотность на $\Phi' = 66^\circ$ в условиях летней освещенной ионосферы упала почти на порядок. Лишь в области каспа совместное действие солнечного ультрафиолета и мощного корпускулярного источника в состоянии поддерживать уровень ионизации $N_e = 5-7 \cdot 10^5$ см⁻³. Скорее всего, на фоне действия таких мощных источников ионизации и потерь, вклад от продольных токов в перераспределение ионизации относительно мал, поскольку, кроме полярного пика ионизации, не наблюдается других хорошо выраженных структур. Несомненно, необходимы модельные расчеты для корректной оценки вклада основных действующих факторов в уравнении баланса ионизации.

На экваториальной границе каспа формируются резкие широтные градиенты N_e , которые вызывают наклонные обратные отражения при ионосферном радиозондировании. Этот результат получил непосредственное подтверждение при одновременных наблюдениях наклонных радиоотражений наземным ионозондом с авроральной станции Тикси и регистрацией структуры каспа со спутника K-900. Интересно отметить, что для этого же события, 29 августа 1979 г., в работе [8] описываются ионосферные эффекты в области каспа по данным станции южного полушария Halley Bay ($\Phi' = -61,8^\circ$, $\lambda = 26^\circ$). Наклонные отражения с большими критическими частотами были обнаружены после 12.00 UT во время основной фазы магнитной бури.

В работе [18] анализируются данные таких ионосферных наблюдательных пунктов, как Cape Parry, Sachs Harbour, Godhavn, которые расположены на широтах вблизи каспа. Методом трассирования радиоволн рассчитаны модельные ионограммы, которые хорошо согласуются с реальными ионограммами. Преимущество наблюдения каспа со станции Тикси, оснащенной антенной системой горизонтальный ромб для возвратно-наклонного радиозондирования, состоит в том, что позволяет прослеживать такую динамическую структуру как касп в большом диапазоне широт (до 15°).

Измерения Гренландского радара некогерентного рассеяния показывают, что в области дневного полярного каспа наблюдаются полярные пики в распределении электронной концентрации, T_e и T_i [7]. Их широтная протяженность, амплитуда и величины градиентов на экваториальной и полюсной границах хорошо согласуются с результатами измерений на спутнике K-900. Как уже отмечалось выше, на экваториальной границе каспа формируются интенсивные обратно отраженные сигналы при наклонном ионосферном зондировании. Наклонно-отраженные сигналы возникают при критическом отражении от резкого широтного градиента N_e , аналогично наклонным отражениям от полярной стенки провала [17]. Наземные ионосферные измерения области дневных радиоотражений со ст. Тикси были также сопоставлены с одновременными измерениями каспа со спутников DMSP за 24 декабря 1979 г., по 6 событиям в октябре 1984 г. и показали хорошее согласие в положении соответствующих структур ($1-1,5^\circ$). Это позволяет сделать вывод о применимости методики ионосферного наклонного зондирования для определения положения дневного полярного каспа.

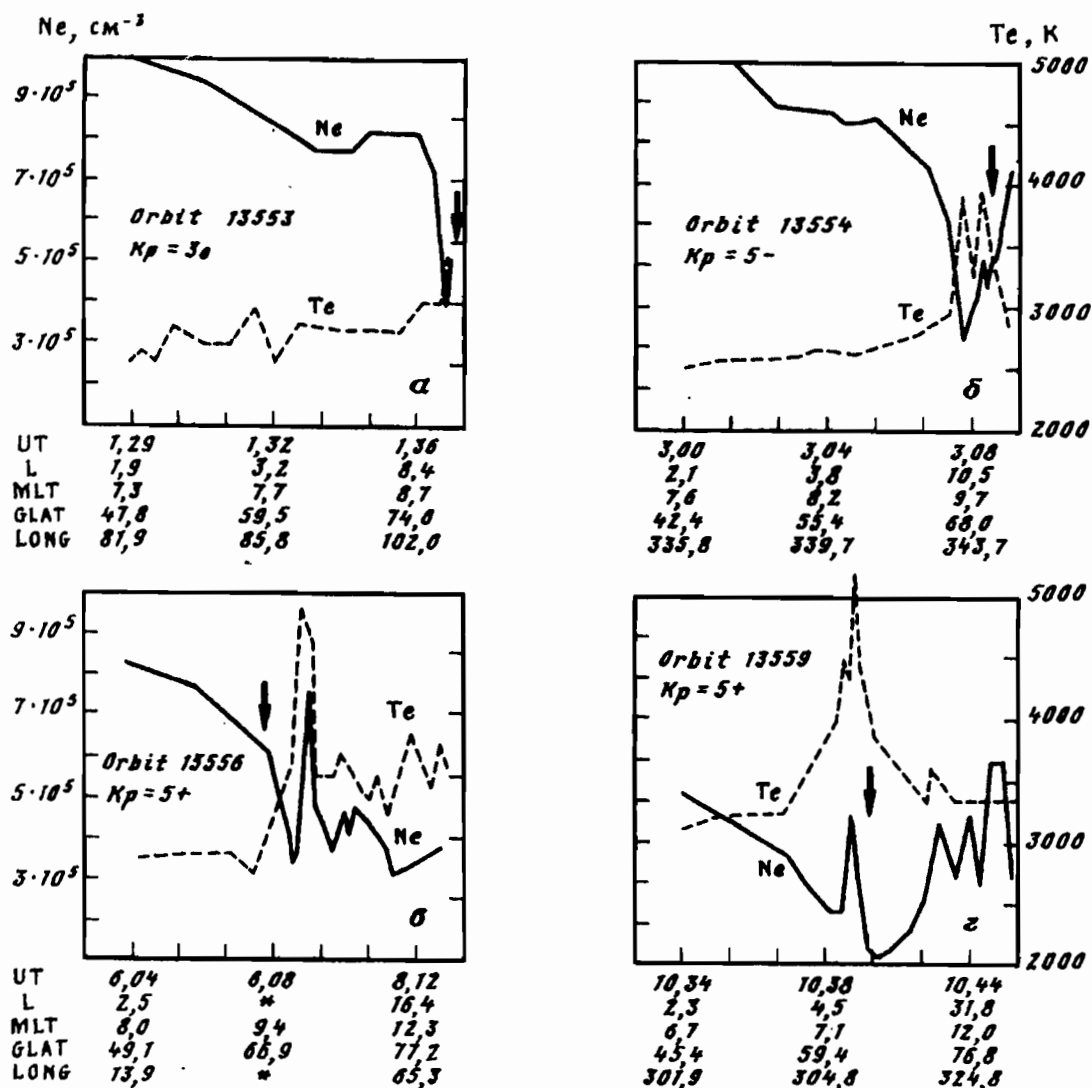


Рис. 2. Меридиональные профили электронной плотности и температуры, полученные по измерениям спутника Космос-900 29.08.79 г. в дневном секторе. Стрелкой отмечены положения каспа по данным спутников DMSP

Минимумы дневных провалов располагаются вблизи каспа, непосредственно примыкая к нему с экваториальной стороны. Это хорошо видно по измерениям на 4-х пролетах спутников К-900 и DMSP, приведенных на рис. 2. По 127 измерениям дневного провала со спутника К-900 методом наименьших квадратов было определено его среднее положение для $K_p = 0-2$ и $K_p = 3-5$. Такие же средние положения каспа были построены по 129 измерениям спутников DMSP. В среднем минимумы дневных провалов N_e наблюдаются на $2-4^\circ$ экваториальнее границы каспа.

Выводы

1. По измерениям тепловой плазмы в ионосфере со спутника Космос-900 и вторгающихся электронов дневного каспа со спутников DMSP в период возмущения 29 августа 1979 г. установлены характерные полярные пики в широтном распределении N_e и T_e протяженностью около 2-х градусов, которые являются ионосферным признаком дневного полярного каспа.
2. Выявленные по данным спутника Космос-900 пики в широтном ходе электронной концентрации в околополуденные часы в высоких широтах обнаруживаются на ионограммах ВНЗ ст. Тикси в виде наклонных радиоотражений от крупномасштабных неоднородностей, формирующихся в области каспа/клефта на высотах F -слоя.
3. Показано, что дневные провалы электронной концентрации локализованы на $2-4^\circ$ экваториальнее каспа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Frank L.A., Ackerson K.L. Observations of charged particle precipitation into the auroral zone // J. Geophys. Res. 1971. V. 76. P. 3612.
2. Heikkila W.J. The morphology of auroral particle precipitation // Space Res. 1972. V. 12. P. 1343.
3. Мулярчик Т.М., Гальперин Ю.Г., Гладышев В.А. и др. Диффузная авроральная зона. VI. Вторжение электронов и протонов в дневном секторе // Космич. исслед. 1982. Т. 20. С. 244.
4. Newell P.T., Meng C.-I. The cusp and cleft/LLBL: Low altitude identification statistical local time variation // J. Geophys. Res. 1986. V. 93. P. 14549.
5. Newell P.T., Meng C.-I., Sibeck D.G., Lepping R. Some low-altitude cusp dependencies on the interplanetary magnetic field // J. Geophys. Res. 1989. V. 94. 8921.
6. Heikkila W.J. Definition of the cusp // In: The Polar Cusp. Eds. Holtet J.A. and Egeland A. NATO ASI Series. Dordrecht. Reidel. 1985. V. 145. P. 387.
7. Nilsson H., Yamauchi M., Eliasson L., et al. Ionospheric signature of the cusp as seen by incoherent scatter radar. J. Geophys. Res. 1996. V. 101. P. 10947.
8. Rodger A.S., Broom S.M. Ionospheric signature of the polar cleft over Halley, Antarctica // Br. Antarc. Surv. Bull. 1986. V. 72. 1.
9. Stiles G.S., Hones E.W., Winningham J.D. et al. Ionosonde observations of the northern magnetospheric cleft during December 1974 and January 1975 // J. Geophys. Res. 1977. V. 82. 67.
10. Newell P.T., Meng C.-I. Ionospheric projections of magnetospheric regions under low and high solar wind pressure conditions. // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. P. 273.
11. Grebowsky J.M., Taylor H.A., Lindsay G. Location and source of ionospheric high-latitude trough // Planet. Space Sci. 1983. V. 31. P. 99.
12. Tulunay Y.K., Grebowsky J.M. The noon and midnight midlatitude trough as seen by ARIEL-4 // J. Atmos. Terr. Phys. 1978. V. 40. P. 845.
13. Wildman P.J.L., Sagalyn R.C., Ahmed M. Structure and morphology of the main plasma trough in the topside ionosphere // Preprint. April. 1976. ~~_____~~
14. Мамруков А.П., Филиппов Л.Д. Якутская меридиональная цепочка ионозондов ВЗ и ВНЗ и ежедневные наблюдения главного ионосферного провала // Эффекты высыпаний заряженных частиц в верхнюю атмосферу. Якутск. ЯФ СО АН СССР. 1979. С. 79–90.
15. Афонин В.В., Беспозванная А.П., Бенькова Н.П. и др. Влияние ММП на дневной провал по данным ИСЗ Космос-900 // Геомагнетизм и аэрономия. 1989. Т. 29. С. 865.
16. Meng C.-I. Dynamic variation of the auroral oval during intense magnetic storm // J. Geophys. Res. 1984. V. 86. P. 227.
17. Гальперин Ю.И., Кранье Ж., Лисаков Ю.В. и др. Диффузная авроральная зона. I. Модель экваториальной границы диффузной зоны вторжения авроральных электронов в вечернем и околополуночном секторах // Космич. исслед. 1977. Т. 15. С. 421.
18. Hoeg P., Ungstrup E. Interpretation of ionograms in the vicinity of the dayside auroral oval by ray tracing // Radio Sci. 1983. V. 18. P. 725.

Институт космофизических исследований
и аэрономии Якутский филиал СО РАН
Институт космических исследований РАН

Поступила в редакцию
11.12.96
После доработки
29.10.97

УДК 550.510.535

© 1998 г. С.А. Пулинец, А.Д. Легенька, Т.И. Зеленова

ЗАВИСИМОСТЬ СЕЙСМО-ИОНОСФЕРНЫХ ВАРИАЦИЙ В МАКСИМУМЕ СЛОЯ F ОТ МЕСТНОГО ВРЕМЕНИ

Исследована зависимость вариаций критической частоты слоя F ионосферы в сейсмо-активных областях в течение нескольких дней до и после сильных землетрясений ($M > 5$) для ряда землетрясений ($n > 50$), эпицентры которых