

УДК 533.9

В. В. Безруких<sup>1</sup>, Г. А. Котова<sup>1</sup>, М. И. Веригин<sup>1</sup>,  
Я. Шмилауер<sup>2</sup>, Ю. И. Венедиктов<sup>3</sup>, Н. А. Барабанов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Інститут космічних досліджень Російської академії наук, Москва

<sup>2</sup>Інститут фізики атмосфери Чеської академії наук, Прага

<sup>3</sup>Спеціальне проектне конструкторське бюро «Дискрет»

Одеського національного політехнічного університету ім. Т. Г. Шевченка

## Температура холодных ионов в ночном секторе плазмосферы Земли

Надійшла до редакції 26.10.06

Розглядається теплова структура нічної плазмосфери на основі результатів вимірювань розподілу концентрації  $n_p$  та температури  $T_p$  холодної плазми у плазмосфері Землі, отриманих на КА «Інтербол-2» («Авроральний зонд») у вересні 1996 р. і супутнику «Магіон-5» у грудні 2001 р. Виявилось, що нічні температури, на відміну від денних, сильно залежать від рівня геомагнітної активності: при підвищенні активності зменшуються значення температури, і, можливо, її висотний градієнт. У спокійних геомагнітних умовах регулярно спостерігається збільшення  $T_p$  із збільшенням висоти (або  $L$ -параметра). Наприклад, на висоті 5000 км  $1600 < T_p < 2800$  К, а на висоті 10000 км —  $3000 < T_p < 4600$  К. У цьому діапазоні висот для геомагнітних широт  $-4^\circ < \lambda < 40^\circ$  середній градієнт температури складає 0.3 К/км. Підвищення  $T_p$  у периферійній частині плазмосфери і на плазмопаузі, очевидно, пов'язане із вторгненням у плазмосферу потоків кеВ-частинок із магнітосфери. Приводяться експериментальні дані про варіації розподілів  $T_p(L)$  у нічній плазмосфері: до початку бурі 26.09.1996 р., під час головної фази і у фазі відновлення. Причини вказаних варіацій обговорюються з урахуванням коротації холодної плазми у силових трубках з Землею. Великомасштабна область з від'ємним градієнтом температури на  $L > 2$ , яка регулярно спостерігалась на КА «Авроральний зонд» у денному секторі плазмосфери протягом періоду, близького до мінімуму сонячного циклу, у нічному секторі у вересні 1996 р. не реєструвалась. Проте у 1999—2001 рр. область з від'ємним градієнтом температури у нічному секторі кілька разів спостерігалась на супутнику «Магіон-5».

### ВВЕДЕНИЕ

Некоторые результаты измерения температуры ионизованного водорода в плазмосфере Земли, полученные на борту КА «Хвостовой зонд» и «Авроральный зонд» в течение 1995—1997 гг., ранее были опубликованы в работах [1, 2]. Были отмечены существенные различия распределений  $T_p(L)$ , измеренных в дневном и ночном секторах плазмосферы ( $T_p$  — температура ионизованного водорода (протонов),  $L$  — параметр Мак-Илвайна). Одним из таких различий является систематически наблюдавшийся в глубине

дневного сектора плазмосферы на  $L > 2.5$  на КА «Авроральный зонд» крупномасштабный глубокий минимум  $T_p$ , который не регистрировался на КА «Авроральный зонд» в ночном секторе [1]. К другому отличию следует отнести принципиально различные реакции тепловых структур дневного и ночного секторов плазмосферы на геомагнитные возмущения. Некоторые данные для ночного сектора свидетельствуют о резком снижении  $T_p$  в ночном секторе непосредственно после начала геомагнитных бурь [1].

Ниже приводятся результаты систематических измерений концентрации  $n_p$  и температуры  $T_p$

ионизированного водорода, полученные в ночном секторе плазмосферы (22—03 ч) MLT на восходящих участках орбит КА «Авроральный зонд» в период, близкий к минимуму солнечного цикла, в сентябре — октябре 1996 г. Также приводятся распределения  $T_p(L)$  и  $n_p(L)$ , полученные на спутнике КА «Магион-5» в ночные часы в период, близкий к максимуму солнечного цикла (22—26 декабря 1999 г.).

#### АППАРАТУРА И УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

На КА «Авроральный зонд» был установлен прибор «Альфа-3». Измерения проводились при помощи плоского широкоугольного модуляционного анализатора типа ПЛ-19. На спутнике КА «Магион-5» был установлен прибор КМ-7 с плоским анализатором с тормозящим потенциалом типа ПЛ-48. На обоих космических аппаратах анализаторы были установлены на затененной от Солнца поверхности и ориентированы в анти-солнечном направлении. Такое расположение анализаторов исключило влияние фотоэффекта с внутренних элементов конструкции анализаторов на результаты измерения энергетических спектров. Супрессорные сетки каждого анализатора, на которые подавался потенциал  $-40$  В, обеспечивали защиту коллекторов от попадания фотоэлектронов с поверхности спутников, обладающих финитными траекториями. Величины температуры  $T_p$  и концентрации  $n_p$  ионизированного водорода, измеренные на КА «Авроральный зонд», получены в результате обработки энергетических спектров, каждый из которых регистрировался в течение 2 с. Интервал между спектрами изменялся от 16 до 64 с. Оба анализатора измеряли энергетические спектры в диапазоне 0—25.5 эВ. Минимальная величина концентрации, которую позволял измерять прибор, в зависимости от ориентации анализатора относительно скорости зонда составляла 20—100 см<sup>-3</sup>. На спутнике КА «Магион-5» время измерения одного спектра составляло 0.4 с, интервал между измеренными спектрами был равен 8 с. Чувствительность прибора КМ-7 в зависимости от ориентации анализатора также обеспечивала измерение концентрации протонов в пределах 20—100 см<sup>-3</sup>.

Спутник «Магион-5» и КА «Авроральный зонд» были запущены одной ракетой на близкие орбиты. Апогей орбиты и период обращения вокруг Земли КА «Авроральный зонд» — 20 000 км и 6 ч, спутника «Магион-5» — 20 000 км и 5 ч 45 мин. В течение сентября — октября 1996 г. КА «Авроральный зонд» пересекал ночной сектор плазмосферы на восходящих витках. При этом геомагнитная широта подспутниковой точки изменялась в пределах  $-10^\circ < \lambda < 40^\circ$ , величина  $L$ -параметра — в пределах  $1.5 < L < 5$ , местное магнитное время — в пределах 22—00—03 MLT.

На спутнике КА «Магион-5» по ряду причин прибор КМ-7 был включен только в декабре 1999 г. В это время геомагнитная широта КА «Магион-5» варьировала в пределах  $10^\circ < \lambda < 33^\circ$ , при  $2.6 < L < 5$  и 1.2—2.1 MLT.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

*Измерения на КА «Авроральный зонд».* Промежуточное положение плазмосферы между сравнительно плотными слоями ионосферы (условно на высоте 1000 км) и областью магнитосферы, где формируется кольцевой ток и наблюдаются потоки плазменного слоя, определяет как геометрию плазмосферы, так и характеристики заполняющего ее ионизированного водорода. Неудивительно поэтому, что распределения концентрации ионизированного водорода  $n_p(L)$  и его температуры  $T_p(L)$ , измеренные на КА «Авроральный зонд» и спутнике КА «Магион-5» в ночном секторе плазмосферы, даже в спокойных геомагнитных условиях характеризуются большим разнообразием. Представление об изменчивости температуры и концентрации протонов в плазмосфере в спокойных условиях по данным КА «Авроральный зонд» дают примеры распределений  $T_p(L)$  и  $n_p(L)$ , зарегистрированных в течение 3—9 сентября 1996 г. при  $0 < K_p < 3$ , в ночном секторе плазмосферы Земли (рис. 1).

Если распределения  $n_p(L)$ , зарегистрированные на КА «Авроральный зонд» (рис. 1) соответствуют существующим представлениям о распределении заряженных частиц в плазмосфере Земли, то распределения  $n_p(L)$ , подобные представленному на рис. 2, в встречаются крайне

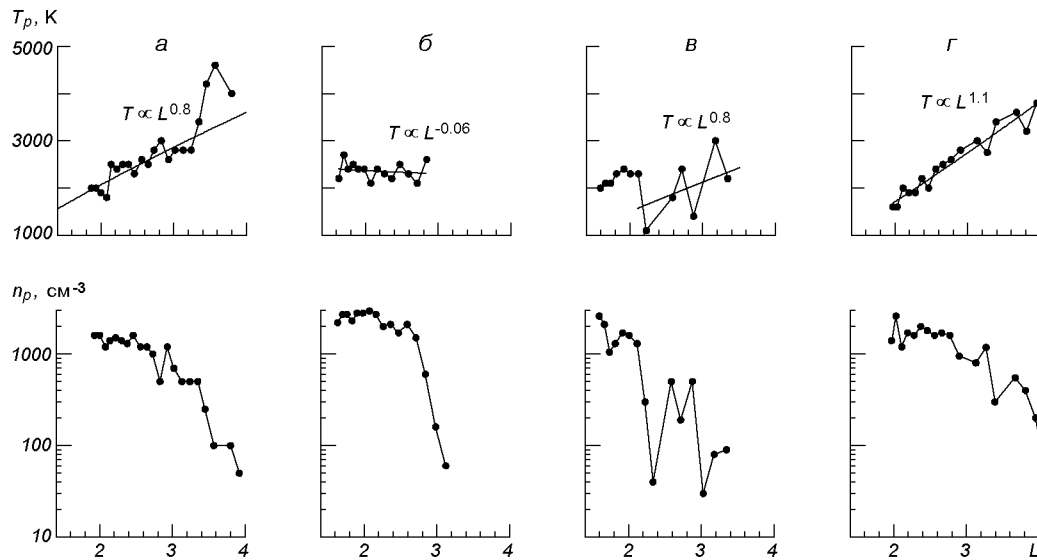


Рис. 1. Примеры распределений  $T(L)$ , (верхний ряд) и  $n(L)$  (нижний ряд) в ночном секторе, измеренных в магнитно-спокойный период в сентябре 1996 г. на КА «Авроральный зонд»: *а* — 03.09.1996 г., 20.01–20.28 UT, 2.1–3.2 MLT,  $H = 5160$ – $10007$  км; *б* — 05.09.1996 г., 12.27–12.45 UT, 1.5–2.1 MLT,  $H = 3441$ – $10835$  км; *в* — 06.09.1996 г., 5.46–6.05 UT, 1.4–2.7 MLT,  $H = 3250$ – $6756$  км; *г* — 09.09.1996 г., 14.57–15.21 UT, 1.5–2.4 MLT,  $H = 5418$ – $9688$  км

редко. Уникальной особенностью этого распределения является наличие двух глубоких провалов на распределениях концентрации и температуры вблизи  $L = 2.2$  и  $L = 3$ . В первом случае концентрация протонов упала с  $1500$  до  $40$   $\text{см}^{-3}$ , во втором — с  $500$  до  $30$   $\text{см}^{-3}$ . Одновременно с падением концентрации были зарегистрированы также падения температуры до уровня, характерного для ионосферы: в первом случае с  $T_p \approx 2300$  К до  $T_p \approx 1000$  К, во втором — с  $T_p \approx 2300$  К до  $T_p \approx 1300$  К. В связи с тем, что рассматриваемые провалы концентрации сопровождаются не повышением температуры, а ее падением, то, по нашему мнению, провал на  $L \approx 2.2$  (а возможно, и на  $L \approx 3$ ) не следует отождествлять с плазмопаузой. По-видимому, во время рассматриваемого пролета КА «Авроральный зонд» через ночной сектор были зарегистрированы изолированные силовые трубки с резко пониженной концентрацией протонов, температура которых не отличалась от ночной температуры ионизированного водорода на ионосферном уровне.

Необходимо отметить, что модели распределения температуры ионизированного водорода в

плазмосфере [8, 9] были разработаны без учета воздействия на холодную плазму, заполняющую плазмосферу, магнитосферных электрических полей, кольцевого тока и потока частиц из нейтрального слоя. Согласно этим моделям рост температуры протонов в плазмосфере практически прекращается на высотах  $H = 5000$  км. Однако несмотря на то, что приведенные на рис. 1 распределения  $T_p(L)$  существенно отличаются друг от друга, три из них (*а*, *в* и *г*) демонстрируют тенденцию роста  $T_p$  с увеличением параметра  $L$  в интервале  $2 < L < 4$  ( $H = 5000 \dots 10000$  км), т. е. там, где согласно моделям [8, 9] рост  $T_p$  наблюдаться не должен. Аппроксимация степенной функцией наиболее часто встречающихся в ночном секторе в глубине плазмосферы на  $1.8 < L < 3.2$  (рис. 1, *а*) или  $L < 4$  (рис. 1, *г*), распределений  $T_p(L)$ , результаты которой приводятся в верхней части рис. 1, показала, что  $T_p \propto L$ . Как правило, во время геомагнитных возмущений, а в некоторых случаях и в спокойных условиях, в ночном секторе на КА «Авроральный зонд» регистрировались распределения  $T_p(L)$ , которые свидетельствуют об ускоренном росте  $T_p$  в периферийной области

плазмосферы на  $L > 3.5$ . Пример таких распределений показан на рис. 1, *а*. Многие исследователи [6, 7] полагают, что ускоренный рост  $T_p$  на периферии плазмосферы обязан нагреву холодной плазмы в результате диссипации энергии вторгающихся в плазмосферу частиц кольцевого тока и/или из нейтрального слоя магнитосферы.

В ночном секторе было зарегистрировано также некоторое количество распределений, подобных показанному на рис. 1, *б*. Отличительными признаками таких распределений являются низкие значения температуры  $T < 3000$  К и весьма слабая зависимость ее от величины  $L$ -параметра при  $1.5 < L < 3.5$ . В работе [7] рассмотрены условия, при которых температура  $T_p$  может быть либо нарастающей функцией  $L$ -параметра, либо не зависеть от него. Согласно [7] при максвелловском распределении на экзобазе (в качестве последней принималась сфера на высоте  $H = 0.5R_E$ ) температура заряженных частиц в плазмосфере будет стремиться к изотермическому равновесию, и следовательно, распределение температуры протонов не будет зависеть от величины  $L$ -параметра. В случае немаксвелловского распределения холодных частиц по скоростям, например распределения с надтепловым хвостом, будут наблюдаться положительные градиенты. Частицы с надтепловыми скоростями могут образовываться в переходной зоне между бесстолкновительной областью и областью, где преобладают столкновения, благодаря убеганию частиц со скоростями, превышающими критические.

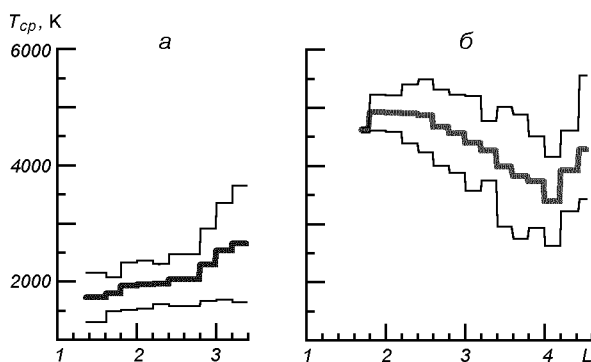


Рис. 2. Средние температуры  $T_{cp}$  ионизованного водорода, измеренные на КА «Авроральный зонд» в сентябре 1996 г. (полуширные линии) и их стандартные отклонения (тонкие линии): *а* — ночные температуры, *б* — дневные

Рост температуры с увеличением  $L$ -параметра отчетливо проявляется и на результатах статистической обработки измерений температуры, представленных на рис. 2. На рис. 2, *а* изображены усредненные величины ночных температур, полученные на КА «Авроральный зонд» в период низкой геомагнитной активности 3—9 сентября 1996 г., при  $0 \leq K_{pm} \leq 2.7$ . Общее количество измерений, использованных в анализе, составляет 300. Для усреднения полный интервал  $1.6 < L < 4$ , в котором мы располагаем результатами измерения температуры, был разделен на подынтервалы  $\Delta L = 0.2$ , в каждом из которых были определены среднее значение температуры  $T_{cp}$  и стандартное отклонение  $\delta$  от среднего значения  $T_{cp}$ . Величины  $T_{cp}$  изображены толстой линией на рис. 3; тонкими линиями показаны величины  $T_{cp} \pm \delta$ .

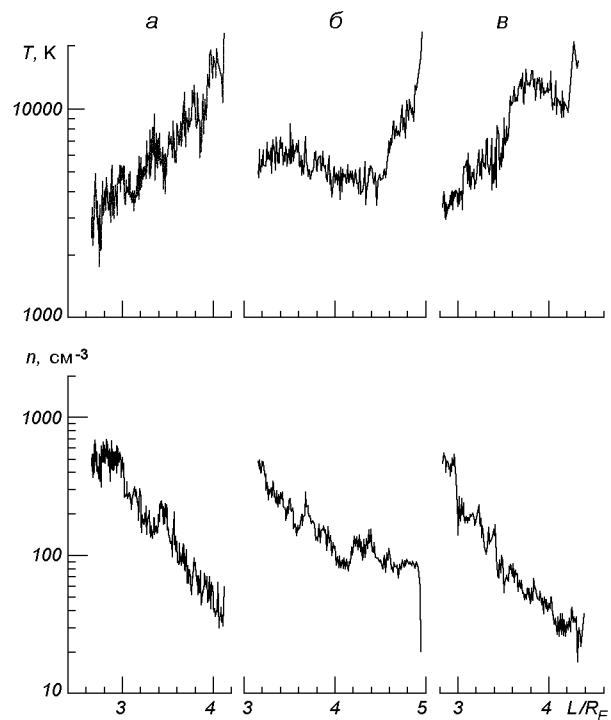


Рис. 3. Примеры распределений  $T(L)$  и  $n(L)$ , измеренных в ночном секторе плазмосферы на спутнике «Магион-5»: *а* — 22.12.1999 г., 23.12—0.03 UT, 1.4—2.6 MLT,  $H = 16200$ —10100 км,  $K_p = 0$ ; *б* — 24.12.1999 г., 4.12—4.47 UT, 1.5—2.1 MLT,  $H = 16000$ —11900 км,  $K_p = 2.3$ ; *в* — 25.12.1999 г., 3.28—4.04 UT, 1.6—2.1 MLT,  $H = 15300$ —10700 км,  $K_p = 3$  на  $L > 2.5$

Для сравнения на рис. 2, б представлены средние значения температур, измеренных в дневном секторе плазмосферы (12—14 MLT). Как и следовало ожидать, представленные на рис. 2, а средние значения  $T_{cp}$  в ночном секторе в глубине плазмосферы на  $L < 2.8$  существенно ниже, чем в дневном. В частности, в ночном секторе на  $L \approx 2$   $T_{cp} < 2200$  К, тогда как в дневном секторе на  $L \approx 2$   $T_{cp} \approx 4400$  К, т. е. в плазмосфере на  $L \approx 2$  и высотах до  $H \sim 6000$  км сохраняется соотношение между ночными и дневными температурами ионов, характерное для ночных и дневных температур на ионосферных высотах. На больших  $L$  в дневном секторе, как правило, наблюдается уменьшение ионных температур, вследствие чего это соотношение нарушается. В ночные часы в глубине плазмосферы на  $1.4 < L < 2.8$   $T_{cp}$  слабо зависит от  $L$ -параметра:  $T \propto L^{0.3}$ , а при больших значениях  $L$ -параметра ( $2.8 < L < 3.48$ )  $T \propto L^{1.0}$ .

**Измерения на спутнике «Магион-5».** На рис. 3 приведены типичные примеры распределений концентрации и температуры протонов в плазмосфере, измеренные на КА «Магион-5», измеренными в магнитно-спокойный период. К сожалению, сопоставление распределений  $T_p(L)$ , измеренных на КА «Авроральный зонд» и спутнике «Магион-5» возможно лишь отчасти, потому что в первом случае измерения были выполнены на  $1.5 < L < 4$ , тогда как во втором — на интервале  $2.8 < L < 5$ .

С учетом изменчивости концентрации холодной плазмы в плазмосфере, величина которой на  $3 < L < 5$  даже в спокойных условиях может достигать коэффициента 3 [7], и непостоянства положения плазмопаузы, можно считать, что ночные распределения  $n(L)$ , измеренные на КА «Авроральный зонд» в период, близкий к минимуму 11-летнего цикла, и на «Магион-5» в период, близкий к максимуму, находятся в удовлетворительном согласии.

Сравнение максимальных значений усредненных величин ночных температур, измеренных на КА «Авроральный зонд» (рис. 3), с измерениями  $T_p$  на «Магион-5» (рис. 5, а, б и в; на рис. 5, б  $T_p$  по понятным причинам следует рассматривать на  $L < 3.5$ ) показывает, что  $T_p$  по данным обоих космических аппаратов существенно отличаются друг от друга. Во-первых,  $T_p$

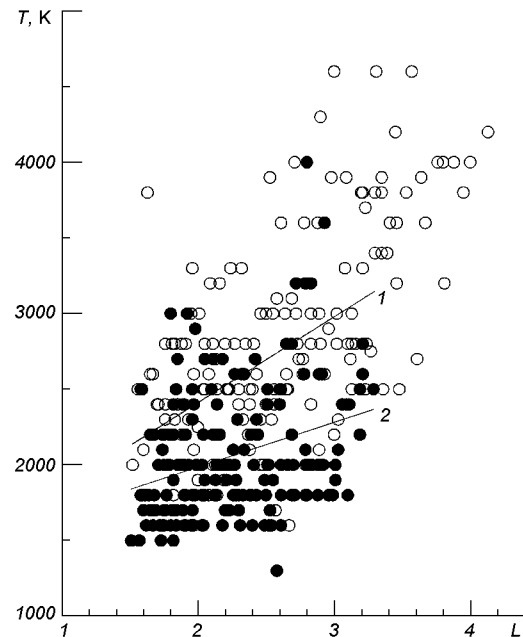


Рис. 4. Температура ионизованного водорода в ночном секторе плазмосферы по данным КА «Авроральный зонд», полученным в сентябре 1996 г. Измерения при низкой геомагнитной активности ( $K_p < 3$ ) показаны кружками при повышенной — точками

по данным «Магион-5» заметно превышают  $T_p$ , измеренным на КА «Авроральный зонд». Во-вторых, распределения  $n(L)$ , измеренные на «Магион-5», обладают четко выраженным минимумом  $T_p$  в периферийной области плазмосферы на  $L > 3.5$ , примыкающей непосредственно к плазмопаузе, тогда как на КА «Авроральный зонд» в ночном секторе он не наблюдался. Не исключено, что формирование ночного (по данным «Магион-5») и дневного минимумов  $T_p$  происходит под влиянием одних и тех же механизмов, природа которых остается неизвестной до сих пор со времени обнаружения минимума  $T_p$  в конце 1970-х гг. [8]. Причины отсутствия минимума  $T_p$  в ночных распределениях температуры, измеренных на КА «Авроральный зонд» при различных уровнях геомагнитной активности, и надежные данные о его существовании, полученные на «Магион-5», по-видимому, могут найти объяснение после более детального изучения взаимодействия ионосферы и плазмосферы.

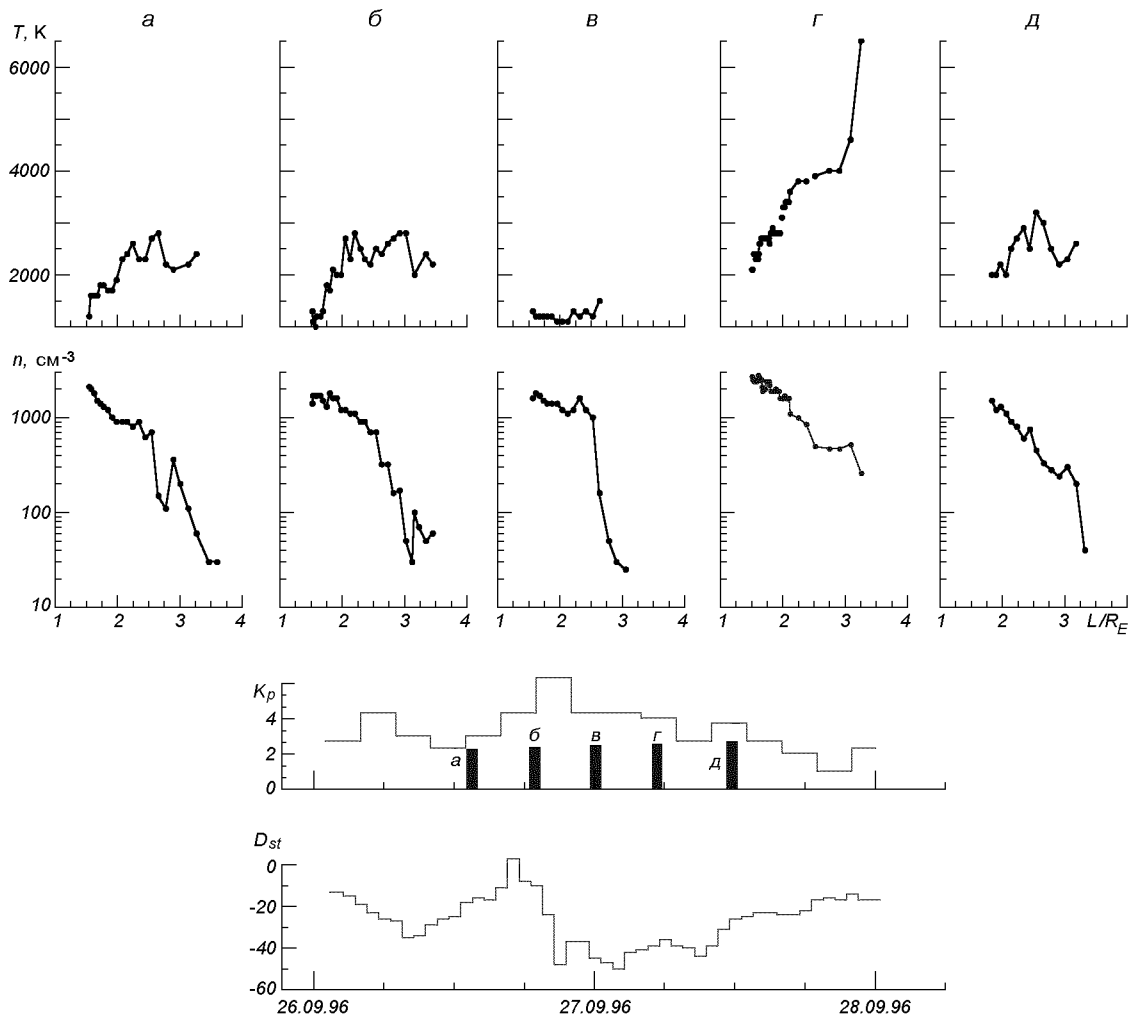


Рис. 5. Распределения  $T(L)$  и  $n(L)$ , измеренные на КА «Авроральный зонд» 26—27 сентября 1996 г.: а — до бури, б — через 5.5 ч после главной фазы бури, в — через 11.5 ч, г — через 12 ч, д — после окончания бури, при  $K_p = 3$ ,  $D_{st} = -15$  нТ. Нижняя часть — значения  $K_p$ -индекса и  $D_{st}$ -вариации 26—27 сентября 1996 г.

**Температура протонов в ночном секторе и геомагнитная активность.** В отличие от слабой зависимости распределения  $T(L)$  от уровня геомагнитной активности [2] в дневном секторе плазмосферы, измерения в ночном секторе свидетельствуют о существенной зависимости температуры от геомагнитной обстановки. На рис. 4 показаны температуры ионизованного водорода, измеренные в течение сентября 1996 г. при  $K_p < 3$  (кружки) и при  $K_p \leq 5.3$  (точки). Там же, в интервале  $1.5 < L < 3.3$ , для

обоих случаев показаны аппроксимирующие прямые ( $T_{cp} = 570L + 1280$  и  $T_{cp} = 300L + 1400$  соответственно).

Данные о ночных температурах, представленные на рис. 4, как и результаты их аппроксимации, свидетельствуют о зависимости тепловой структуры ночной плазмосферы от уровня геомагнитной активности. Эта зависимость выражается в понижении температуры  $T_p$  и уменьшении ее градиентов  $\partial T_p / \partial L$  внутри ночной плазмосферы при росте уровня геомагнитной

возмущенности (в частности, от величины  $K_p$ -индекса). Зависимость температуры ионов от геомагнитной активности согласно измерениям на КА «Авроральный зонд» в области  $1.5 < L < 4$  наблюдается в секторе 22—03 MLT. За пределами этого временного сектора, как правило, вид распределений  $T(L)$  практически не отличается от вида распределений, регистрируемых внутри сектора, однако зависимость температуры от геомагнитной активности не наблюдается.

Рассмотрение динамики распределений концентрации и температуры ионов водорода в ночном секторе плазмосферы во время развития магнитной бури 26—27 сентября 1996 г. позволяет нам представить механизмы и процессы, которые приводят к прарадоксальному, на первый взгляд, статистическому результату — понижению температуры ионов в ночном секторе при повышении магнитной активности (см. рис. 5).

На верхней части рис. 5 показаны распределения  $T(L)$  и  $n(L)$ , измеренные 26—27 сентября 1996 г. с интервалами около 6 ч до магнитной бури (рис. 5, а), во время (рис. 5, б, в, г) и после нее (рис. 5, д). В нижней части рис. 5 представлены величины  $K_p$  и  $D_{st}$  для рассматриваемого периода. Как видно из рис. 5, распределения а и б подобны друг другу и типичны для спокойных условий, несмотря на то, что первое измерено в спокойных условиях, а второе — через 5.5 ч после минимума главной фазы. На следующем витке зонда (рис. 5, в), через 11.5—12 ч после главной фазы, было зарегистрировано приближение плазмопаузы к Земле и уменьшение температуры в плазмосфере в области от  $L > 1.5$  вплоть до плазмопаузы до величин 1000—1200 К. Спустя 18 ч после главной фазы прибор зарегистрировал в ночном секторе на  $1.5 < L < 3.5$  плазму с температурой  $2000 < T < 6000$  К. К сожалению, на этом витке измерения были прерваны на  $L > 3.5$ . Наконец, после окончания бури, при  $K_p = 3$ ,  $D_{st} = -15$  нТ (см. рис. 5, д), значения температур холодных протонов вернулись к величинам, измеренным до бури.

Резкое понижение температуры, зарегистрированное в процессе развития магнитной бури 26—27 сентября 1996 г. (см. рис. 5, в) может являться результатом цепочки последовательных событий, происходящих во время развития

магнитной бури. Согласно данным [3] рост уровня магнитной возмущенности сопровождается увеличением крупномасштабного электрического поля в магнитосфере в направлении утро — вечер. Увеличенное электрическое поле позволяет малоэнергичной плазме, содержащейся в силовых трубках в ночном секторе, выйти из плазмосферы во внешнюю магнитосферу в результате  $E \times B$ -дрейфа, после чего происходит опустошение силовых трубок более холодной ионосферной плазмой. Необходимо отметить, что рассмотренная последовательность событий в магнитосфере и плазмосфере может осуществляться при условии перестройки системы обменных потоков плазмы между плазмосферой и ионосферой: поток холодной плазмы, который в спокойных условиях ночью направлен из плазмосферы в ионосферу, должен изменить свое направление на обратное.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Впервые получены экспериментальные данные о резком (до 1000 К) понижении температуры ионизированного водорода в ночном секторе плазмосферы Земли (23—02 MLT), инициированном магнитными возмущениями.

2. По-видимому, понижение температуры является результатом развития цепочки последовательных процессов, происходящих в магнитосфере во время магнитной бури:

- возрастание крупномасштабного поперечного электрического поля после начала магнитной бури;
- выход холодной плазмы из ночного сектора плазмосферы в хвост магнитосферы в результате  $E \times B$ -дрейфа после увеличения электрического поля и связанное с этим опустошение силовых трубок в ночном секторе;
- заполнение опустошенных силовых трубок низкотемпературной плазмой из ионосферы.

3. Обнаруженное на КА «Авроральный зонд» во время магнитной бури падение температуры свидетельствует о том, что во время магнитной бури в ночные часы происходит перестройка системы обменных потоков плазмы между плазмосферой и ионосферой, при которой поток холодной плазмы, в спокойных условиях ночью

направленный из плазмосферы в ионосферу, изменяет свое направление на обратное.

Дальнейшее изучение обнаруженной на КА «Авроральный зонд» связи между понижением температуры малоэнергичной плазмы в ночном секторе плазмосферы и повышением магнитной активности нуждается в дополнительных скоординированных исследованиях ионосферы и магнитосферы.

Авторы благодарят Ж. Лемера и В. Пьерар за полезные обсуждения.

1. Безруких В. В., Веригин М. И., Котова Г. А. и др. Динамика плазмопаузы и распределения концентрации холодной плазмы в плазмосфере Земли в процессе развития геомагнитных бурь по результатам эксперимента «Авроральный зонд»/«Альфа-3» // Космич. исслед.—2000.—30.—С. 536—548.
2. Безруких В. В., Котова Г. А., Лемер Ж. и др. Динамика температуры и концентрации холодных протонов плазмосферы Земли, связанная геомагнитными возмущениями по данным эксперимента «Авроральный зонд»/«Альфа-3» // Космич. исслед.—2003.—41.—С. 417—427.
3. Carpenter D. L., Anderson R. R. An ISEE/whistler model of equatorial electron density in the magnetosphere // J. Geophys. Res.—1992.—97.—P. 1097—1108.
4. Comfort R. H., Waitte J. H., Chappell C. R. Thermal Ion Temperatures From Ion Mass Spectrometer DE-1 // J. Geophys. Res.—1985.—90.—P. 3475—3486.
5. McIlwain C. E. A  $K_p$  dependent equatorial electric field model // Adv. Space Res.—1986.—6, N 1.—P. 87—197.
6. Olsen R. C., Shawhan S. D., Gallagher D. L., et al. Plasma observations at the Earth's magnetic equator // J. Geophys. Res.—1987.—92.—P. 2385.
7. Pierrard V., Lemaire J. Lorenzian ion exospheric model // J. Geophys. Res.—1996.—101.—P. 7923—7934.
8. Titheridge J. E. Temperatures in the upper ionosphere and plasmasphere // J. Geophys. Res.—1998.—103.—P. 2261—2277.

9. Webb P. A., Essex E. A. Modification to the Titheridge upper ionosphere and plasmasphere temperatures model // J. Geophys. Res.—2003.—108, N A10.

---

#### TEMPERATURE OF COLD IONS IN THE NIGHT-TIME SECTOR OF THE EARTH'S PLASMASPHERE

*V. Bezrukikh, G. Kotova, M. Verigin, J. Smilauer, Yu. Venediktov, N. Barabanov*

The thermal structure of night-time plasmasphere is examined on the basis of some results of measurements of the distribution of concentration  $n_p$  and temperatures  $T_p$  of cold plasma in the Earth's plasmasphere. The results were obtained aboard the SA «Interball-2» («Auroral probe») in September 1996 and the satellite «Magion-5» in December 2001. It is found that night-time temperatures, unlike day-time ones, strongly depend on the geomagnetic activity level: the values of temperature and, possibly, its height gradient diminish with increasing the activity. In quiet geomagnetic conditions the increase of  $T_p$  with increasing height (or  $L$ -parameter) was observed regularly. For example, at a height of 5000 km  $1600 < T_p < 2800$  K and at a height of 10000 km  $3000 < T_p < 4600$  K. In this range of heights, middle gradient of temperature is 0.3 K/km for geomagnetic latitude  $-4^\circ < \lambda < 40^\circ$ . Increase of  $T_p$  in peripheral part of plasmasphere and in plasmopause, obviously, is related to intrusion of streams of keV-particles from magnetosphere to plasmasphere. Some experimental data on variations of distribution of  $T_p(L)$  in night-time plasmasphere are given: before the beginning of the storm of 26 September 1996, during the main phase and in the phase of renovation. The reasons of the variations are discussed with allowance made for the corotation of cold plasma in the Earth's power tubes. Large-scale region with the negative gradient of temperature on  $L > 2$ , which was regularly observed by the SA «Auroral probe» in the day-time sector of plasmasphere during the period close to the minimum of solar cycle, was not detected in the night-time sector in September 1996. However, in 1999—2001 the region with the negative gradient of temperature in the night-time sector was observed by the satellite «Magion-5» once or twice.