

УДК 551.510.537

ДРЕЙФ ИОНОВ ВО ВНУТРЕННЕЙ ПЛАЗМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ ВО ВРЕМЯ МАГНИТОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ И ДИНАМИКА ТЕМПЕРАТУРЫ ПРОТОНОВ

© 2011 г. М. И. Веригин¹, Г. А. Котова¹, В. В. Безруких¹, В. В. Богданов², А. В. Кайсин²

¹ Учреждение РАН Институт космических исследований, г. Москва
e-mail: kotova@iki.rssi.ru

² Учреждение РАН Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,
п. Паратунка, Камчатка

Поступила в редакцию 27.01.2010 г.

По данным измерений тепловой плазмы во внутренней плазмосфере Земли на спутниках ИНТЕРБОЛ-2 и МАГИОН-5 показано, что во время главной фазы магнитных бурь температура ионов плазмосферы, как правило, понижается, плотность плазмы при этом повышается или сохраняется на уровне, характерном для невозмущенных условий. Рассмотрен физический механизм, описывающий дрейф ионов во время магнитной бури, приводящий к понижению температуры. Показано, что для холодной околоэкваториальной плазмы третий адиабатический инвариант сохраняется и в процессах с характерным временем меньшим, чем период дрейфа заряженных частиц вокруг Земли. Построенная модель перемещения дрейфовой оболочки от Земли, вызванного уменьшением магнитного поля во внутренней плазмосфере при развитии магнитной бури, удовлетворительно описывает понижение температуры протонов вблизи экваториальной плоскости.

1. ВВЕДЕНИЕ

Характеристики плазмы в плазмосфере Земли, структура и динамика ее границы — плазмопаузы — чрезвычайно чувствительны к геомагнитным возмущениям в магнитосфере. Зависимость положения плазмопаузы от геомагнитной активности, процессы опустошения и заполнения плазмосферы подробно исследовались теоретически и экспериментально [Lemaire and Gringauz, 1998; Котова, 2007]. Данные недавних экспериментов на космических аппаратах CLUSTER и IMAGE существенно расширили представления о вариациях распределения плотности плазмы в плазмосфере, выявили ряд новых особенностей в структуре плазмосферы и плазмопаузы [Darrouzet et al., 2009].

Тем не менее, вариации параметров плазмы во внутренней плазмосфере во время магнитосферных бурь еще недостаточно хорошо изучены. Принято считать, что плотность во внутренней не опустошенной части плазмосферы уменьшается во время бури [Carpenter and Park, 1973; Spasojevic and Sandel, 2010], однако всегда ли так происходит — неизвестно, и, соответственно, не полностью описана совокупность физических процессов, ответственных за изменение плотности плазмы во внутренней плазмосфере. В отличие от плотности плазмы ее температура может быть измерена только в прямых экспериментах, и поэтому массив данных по температуре плазмы в плазмосфере более ограничен.

Наиболее подробно изучена динамика температуры утреннего и вечернего секторов плазмосферы по данным масс-спектрометра с тормозящим потенциалом RIMS, работавшего на спутнике DE-1. По данным этого эксперимента на утренней стороне плазмосферы при $L < 3.0$ температура ионов практически не зависит от уровня геомагнитной активности. На вечерней стороне в области $2 < L < 3$ средние температуры, характерные для периодов низкой и умеренной магнитной активности, близки, но в периоды высокой активности температура несколько понижена. Температура ионов внешней плазмосферы, наоборот, возрастает при увеличении магнитной активности [Comfort, 1996].

По данным измерений холодной плазмы на космическом аппарате ИНТЕРБОЛ-2 (1996 г.) и на его субспутнике МАГИОН-5 (1999–2000 гг.) также получены распределения плотности и температуры тепловых протонов в плазмосфере Земли. По этим измерениям во время развития небольших и умеренных магнитных бурь было обнаружено, что во внутренней плазмосфере температура падала на главной фазе бури, а на фазе восстановления часто возрастала до значений, превышающих наблюдавшиеся перед бурей в магнито-спокойный период [Котова и др., 2007; Kotova et al., 2008].

Целью данной работы является подробный анализ эффекта понижения температуры во внутренней плазмосфере и детализация физического

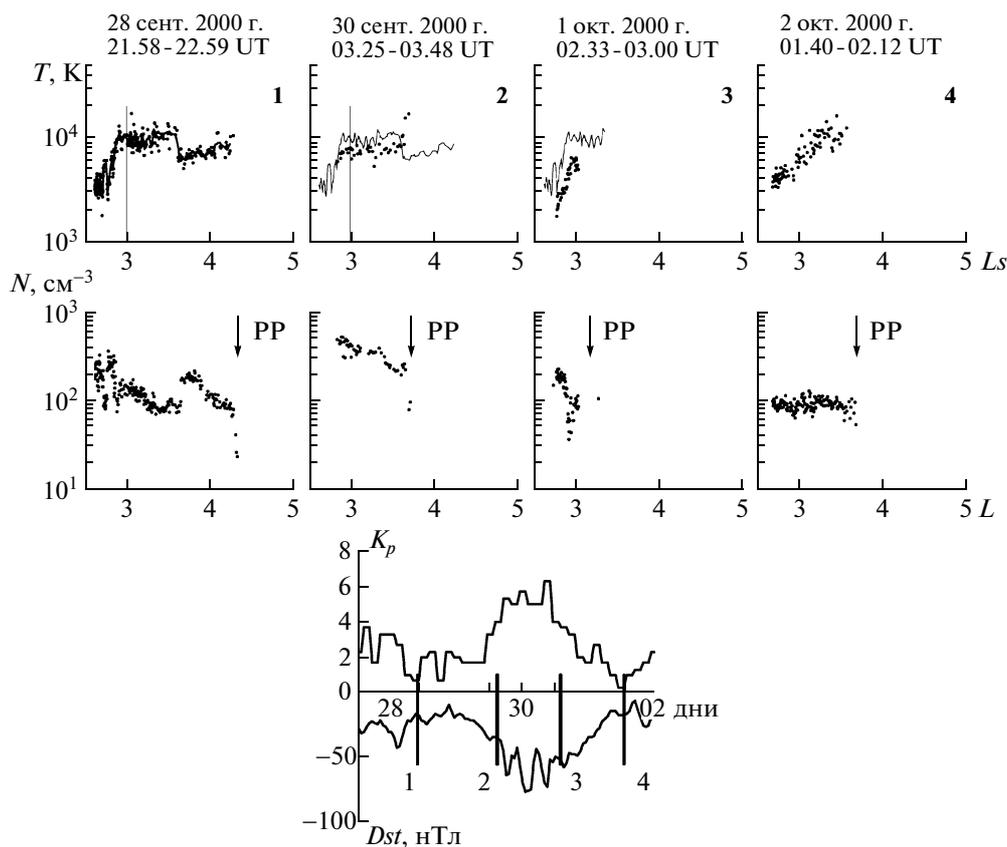


Рис. 1. Плотность и температура тепловых протонов, измеренные на МАГИОН-5 при пересечении ночной плазмосферы Земли (1.2–1.9 MLT) вблизи геомагнитного экватора во время небольшой магнитной бури. Точки — измеренные значения плотности и температуры. Тонкая сплошная линия на температурных графиках 1, 2 и 3 — бегущее среднее значение температуры для 28 сентября 2000 г. Стрелки на графиках плотности — положение плазмоспаузы (PP). Внизу — изменения индексов K_p и Dst в рассматриваемый интервал времени (<http://swdcd.b.kugi.kyoto-u.ac.jp/>). Линии указаны соответствующие времена измерений.

механизма, описывающего дрейф ионов во время магнитной бури и приводящего к понижению температуры. Для этого во втором разделе будут представлены примеры экспериментальных данных, свидетельствующие об уменьшении температуры протонов на главной фазе магнитных бурь. В третьем разделе — рассмотрен физический механизм, приводящий к понижению температуры плазмы во внутренней плазмосфере при уменьшении магнитного поля, и в четвертом разделе — полученные теоретические результаты сравниваются с измерениями спутника МАГИОН-5 во время развития 12 магнитных бурь, а также с наблюдениями ИНТЕРБОЛ-2 во время двух магнитных бурь.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

На борту космического аппарата ИНТЕРБОЛ-2 измерения тепловой плазмы проводились комплексом приборов Альфа-3, в состав которого входил модуляционный анализатор ПЛ-19. Энергетические спектры в диапазоне 0–25 эВ измеря-

лись в течение 2 с один раз в 15 с или в 280 с в зависимости от телеметрической моды [Безруких и др., 1998]. Небольшой период околополярной орбиты спутника (6 ч) особенно удобен для анализа влияния магнитной активности на динамику характеристик плазмосферы.

Измерения энергетических спектров тепловой плазмы на субспутнике МАГИОН-5 спутника ИНТЕРБОЛ-2 проводились с помощью анализатора с тормозящим потенциалом ПЛ-48 в течение 0.4 с каждые 8 с. К сожалению, эти измерения начались уже после окончания работы основного аппарата, и проходили, главным образом, только на нисходящей части орбиты, один раз за сутки [Котова и др., 2008].

Ранее аналогичные данные о тепловой плазме, полученные на космическом аппарате ИНТЕРБОЛ-1 с помощью прибора ПЛ-48 сравнивались с данными масс-спектрометра с тормозящим потенциалом RIMS, работавшего на космическом аппарате DE-1 [Kotova et al., 2002]. Хорошее согласие данных подтверждает надежность измере-

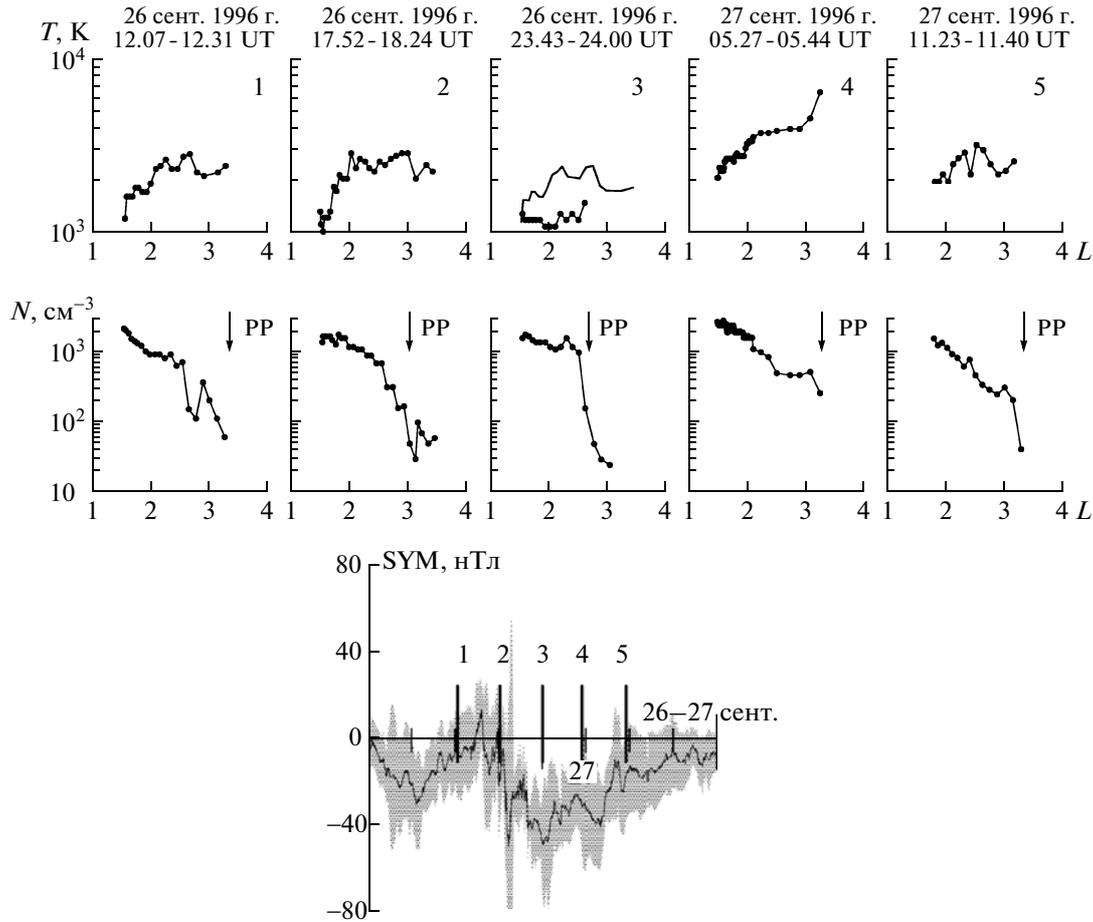


Рис. 2. Плотность (внизу) и температура (вверху) тепловых протонов, измеренные на спутнике ИНТЕРБОЛ-2 26–27 сентября 1996 г. при последовательных пролетах спутника через ночную плазмосферу (23.5–1.5 MLT) на геомагнитной широте -15° – -30° во время развития небольшой магнитной бури. Номера на верхних графиках соответствуют временам, отмеченным на нижнем графике, показывающем вариации *SYM* – индекса (<http://swdcdb.kugi.kyoto-u.ac.jp/>). Заштрихована область $SYM \pm ASYH/2$. Стрелки на графиках плотности – положения плазмопаузы (PP). Тонкая сплошная линия на температурном графике 3 – профиль температуры, рассчитанный в приближении дрейфа протонов в экваториальной плоскости по начальному профилю 1 (T_{in}) при $B_{dst} = -80$ нТл.

ний тепловой плазмы на космических аппаратах проекта ИНТЕРБОЛ.

На рис. 1 показан пример распределений плотности и температуры протонов в зависимости от параметра L , измеренных последовательно один раз в сутки 28 сентября – 2 октября 2000 г. при входе спутника МАГИОН-5 в ночную плазмосферу во время развития небольшой магнитной бури. Во время развития возмущения с ростом величины Kp и уменьшением Dst -индекса плазмопауза приближается к Земле до $L \sim 3.1$. Обращает на себя внимание не соответствующий распространенным представлениям [Spasojevic and Sandel, 2010] факт, что на начальной фазе бури плотность во внутренней плазмосфере на $L < 2.8$ не уменьшается, а возрастает и падает только позже с развитием возмущения. Температура во внутренней плазмосфере в период вблизи минимума Dst -вариации уменьшается.

На рис. 2 показаны примеры распределения плотности и температуры протонов, полученные на ИНТЕРБОЛ-2 при последовательных (через ~ 6 ч) пролетах спутника через плазмосферу во время развития небольшой магнитной бури 26–27 сентября 1996 г. Первые два пересечения плазмосферы происходили при почти спокойных геомагнитных условиях, третий же раз спутник пересекал плазмосферу на главной фазе бури при минимальном значении индекса *SYM*. Индекс *SYM* аналогичен индексу Dst только с минутным, а не с часовым, временным разрешением и характеризует симметричный по долготе компонент возмущения магнитного поля. Индекс же *ASYH* описывает разницу между максимальным и минимальным отклонениями возмущения магнитного поля от среднего возмущения *SYM*. В пролете 3 (см. рис. 2) наблюдалась чрезвычайно низкая температура ионов в глубине плазмосферы.

ры, однако концентрация на $L \approx 2$ практически не изменилась по сравнению с измеренной в предыдущих пролетах. Через 6 ч, на следующем пролете 4, на фазе восстановления температура ионов в ночной плазмосфере была даже выше значений, зарегистрированных ранее при спокойных условиях, и только на следующем витке регистрировалась температура, характерная для спокойных условий. Измерения в этих пролетах проходили на геомагнитной широте 15° – 30° .

3. МОДЕЛЬ ДРЕЙФА ИОНОВ ВО ВНУТРЕННЕЙ ПЛАЗМОСФЕРЕ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНОЙ БУРИ

Рассмотрим простую модель возмущения магнитного поля в плоскости геомагнитного экватора вблизи Земли при возрастании симметричного кольцевого тока во время магнитной бури.

Пусть \mathbf{E} – дополнительное вихревое электрическое поле, появляющееся из-за изменения магнитного поля $\partial\mathbf{B}/\partial t$:

$$\text{rot } \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}. \quad (1)$$

В экваториальной плоскости и это поле \mathbf{E} , и магнитное поле \mathbf{B} имеют по одной компоненте в цилиндрической системе координат (r, φ, z) , в которой ось z направлена вдоль оси диполя:

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= (0, E_\varphi(r, t), 0), \\ \mathbf{B} &= (0, 0, B_z(r, t)), \end{aligned} \quad (2)$$

где $B_z(r, t) = B_e(r_e/r)^3 + B_{dst}(t)$, B_e – стационарное поле на поверхности Земли на экваторе, B_{dst} – дополнительное магнитное поле, связанное с бурей, r_e – радиус Земли. Подставив (2) в (1) получим:

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial(rE_\varphi)}{\partial r} &= -\frac{1}{c} \frac{\partial B_z(r, t)}{\partial t} = -\frac{1}{c} \frac{dB_{dst}(t)}{dt}, \\ \partial(rE_\varphi) &= -\frac{1}{c} \frac{dB_{dst}(t)}{dt} r \partial r, \end{aligned} \quad (3)$$

$$E_\varphi(r, t) = -\frac{r}{2c} \frac{dB_{dst}(t)}{dt}.$$

С учетом (3) скорость радиального дрейфа

$$V_{dr} = c \frac{E_\varphi(r, t)}{B_z(r, t)} = -\frac{r}{2B_z(r, t)} \frac{dB_{dst}(t)}{dt}. \quad (4)$$

С этой скоростью за время dt протон продрейфует на расстояние

$$dr = V_{dr} dt = c \frac{E_\varphi(r, t)}{B_z(r, t)} dt = -\frac{r}{2B_z(r, t)} dB_{dst}. \quad (5)$$

Таким образом, получено дифференциальное уравнение:

$$\frac{dr}{dB_{dst}} = -\frac{r}{2(B_e(r_e/r)^3 + B_{dst})}. \quad (6)$$

Проинтегрировав (6) можно получить радиус новой дрейфовой оболочки протона в зависимости от B_{dst} : $r = r(B_{dst})$. Интегрирование проще выполнить для обратной функции $B_{dst} = B_{dst}(r)$, поскольку для нее уравнение (6) превращается в линейное:

$$\frac{dB_{dst}}{dr} + \frac{2}{r} B_{dst} = -\frac{2B_e r_e^3}{r^4}. \quad (7)$$

Решение этого уравнения, умноженное на πr^2 :

$$\pi r^2 B_{dst} - \frac{2\pi B_e r_e^3}{r} = \pi r_{in}^2 B_{dst}^{in} - \frac{2\pi B_e r_e^3}{r_{in}}, \quad (8)$$

где r_{in} – радиус дрейфовой оболочки протона до начала его дрейфа при $B_{dst} = B_{dst}^{in}$. Поскольку поток дипольной составляющей магнитного поля через дрейфовую оболочку

$$\Phi_d(r) = \int_0^r \frac{B_e r_e^3}{r^3} 2\pi r dr = -\int_r^\infty \frac{B_e r_e^3}{r^3} 2\pi r dr = -\frac{2\pi B_e r_e^3}{r_{in}}, \quad (9)$$

то решение (8) может быть записано как:

$$\Phi_d(r) + \pi r^2 B_{dst} = \Phi_d(r_{in}) + \pi r_{in}^2 B_{dst}^{in}, \quad (10)$$

т.е. в виде сохранения полного потока магнитного поля через дрейфовую оболочку (третий адиабатический инвариант).

Так как при выводе уравнения (7) протону все не требовался полный оборот вокруг Земли, то (8, 10) могут быть использованы и для более быстрых процессов. По-видимому, для их применимости достаточно, чтобы за циклотронный период τ_c

$$\frac{\partial B}{\partial t} \tau_c \ll B. \quad (11)$$

Прямая зависимость от B_{dst} радиуса оболочки, куда придрейфует протон, стартовавший с r_{in} , может быть получена решением кубического относительно $r = r(B_{dst})$ уравнения (8). Приближенное решение этого уравнения при $r - r_{in} \ll r_{in}$:

$$r \approx r_{in} + \frac{r_{in}}{2} \frac{B_{dst}^{in} - B_{dst}}{B_e r_e^3 / (r_{in}^3 + B_{dst})}. \quad (12)$$

Так как $B_{dst} < 0$ и во внутренней плазмосфере $B_e r_e^3 / r_{in}^3 > |B_{dst}|$, то $r > r_{in}$ и протоны дрейфуют от Земли.

Однако, чтобы решить обратную задачу и найти r_{in} – расстояние от центра Земли, откуда стартовал протон, придрейфовавший на $r = r(B_{dst})$, достаточно решить это же уравнение (8) линейное

относительно r_{in} при $B_{dst}^{in} \approx 0$, т.е. при всегда выполняющемся условии $|B_{dst}^{in}| \ll 2B_e r_e^3 / r_{in}^3$. В этом случае

$$\frac{r_{in}}{r_e} = \frac{r/r_e}{1 - \frac{B_{dst}}{2B_e} \left(\frac{r}{r_e}\right)^3}. \quad (13)$$

На рис. 3 представлена зависимость $L_{in} = r_{in}/r_e$ от $L = r/r_e$ (13) для различных значений возмущения магнитного поля B_{dst} ($L = r/r_e$ – параметр Мак-Илвейна, расстояние до силовой линии на геомагнитном экваторе в радиусах Земли). Дрейф протонов становится заметным при $L > \sim 2.2$.

Посмотрим теперь, как изменится температура протона при дрейфе. Из условия сохранения первого адиабатического инварианта $T/B = \text{const}$, очевидно, что при уменьшении магнитного поля ($B_{dst} < 0$) температура также уменьшается:

$$\begin{aligned} \frac{T_{in}}{B_{in}} &= \frac{T_r}{B_z(r, t)} \quad \text{или} \quad T_r = \frac{T_{in} B_z(r, t)}{B_{in}} = \\ &= T_{in} \frac{B_{in} (r_{in}/r)^3 + B_{dst}}{B_{in}} = T_{in} \left(\left(\frac{r_{in}}{r}\right)^3 + \frac{B_{dst}}{B_e} \left(\frac{r}{r_e}\right)^3 \left(\frac{r_{in}}{r}\right)^3 \right), \end{aligned} \quad (14)$$

где B_{in} , T_{in} – соответственно магнитное поле и температура протона до начала возмущения на расстоянии r_{in} от центра Земли. Таким образом, изменение температуры протонов на оболочке r можно оценить как:

$$\frac{T_r}{T_{in}} = \frac{1 + \frac{B_{dst} r^3}{B_e r_e^3}}{\left(1 - \frac{B_{dst} r^3}{2B_e r_e^3}\right)^3}. \quad (15)$$

При степенном профиле температуры в плазмосфере до бури с температурами T_{in} и T_{inr} на расстояниях r_{in} и r , соответственно:

$$T_{in} = T_{inr} \left(\frac{r_{in}}{r}\right)^p. \quad (16)$$

С учетом (16) изменение температуры протонов на оболочке r :

$$\frac{T_r}{T_{inr}} = \frac{1 + \frac{B_{dst} r^3}{B_e r_e^3}}{\left(1 - \frac{B_{dst} r^3}{2B_e r_e^3}\right)^{3+p}}. \quad (17)$$

Линеаризация этого выражения при $p = 0$ приводит к известным оценкам изменения T при медленных изменениях B_{dst} [Редерер, 1972]:

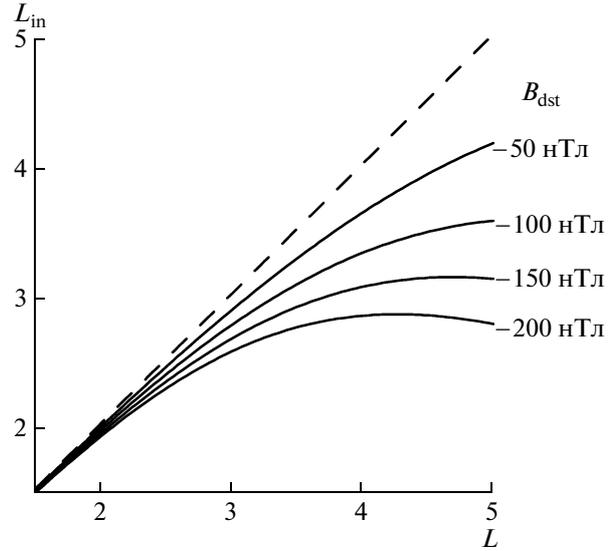


Рис. 3. Зависимость начального положения протона от его наблюдаемого конечного положения при различных значениях возмущения магнитного поля, вызванного кольцевым током.

$$T_r = T_{inr} + \frac{5B_{dst} r^3}{2B_e r_e^3} T_{inr}. \quad (18)$$

Разумеется, исходное выражение (17) имеет более широкую область применимости, чем (18).

Из выражения (17) видно, что чем круче профиль температуры в спокойных условиях до магнитной бури, тем больше падение температуры во время бури. На рис. 4 показаны возможные изменения температуры протонов во время магнитной бури (зависимость, обратная (17)) для различных значений возмущения поля B_{dst} и различных показателей степени p . Видно, что, например, на $L = 3$ температура протонов может упасть в 2 раза при $B_{dst} = -200$ нТл. Так как профиль температуры во внутренней плазмосфере при невозмущенных условиях может быть гораздо более крутым, чем рассмотрено на рис. 4 ($p > 1.5$), температура протонов может существенно уменьшаться и во время небольших магнитных бурь.

4. ОБСУЖДЕНИЕ. СРАВНЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ТЕМПЕРАТУР

На рис. 5 показаны те же последовательные распределения температуры протонов во время развития небольшой магнитной бури, которые представлены на рис. 1, но теперь тонкими линиями на панелях 2 и 3 показаны профили температуры, пересчитанные по начальному распределению температуры $T_{in}(L)$ панели 1. Для оболочки $L = r/r_e$, для которой мы собираемся рассчитать

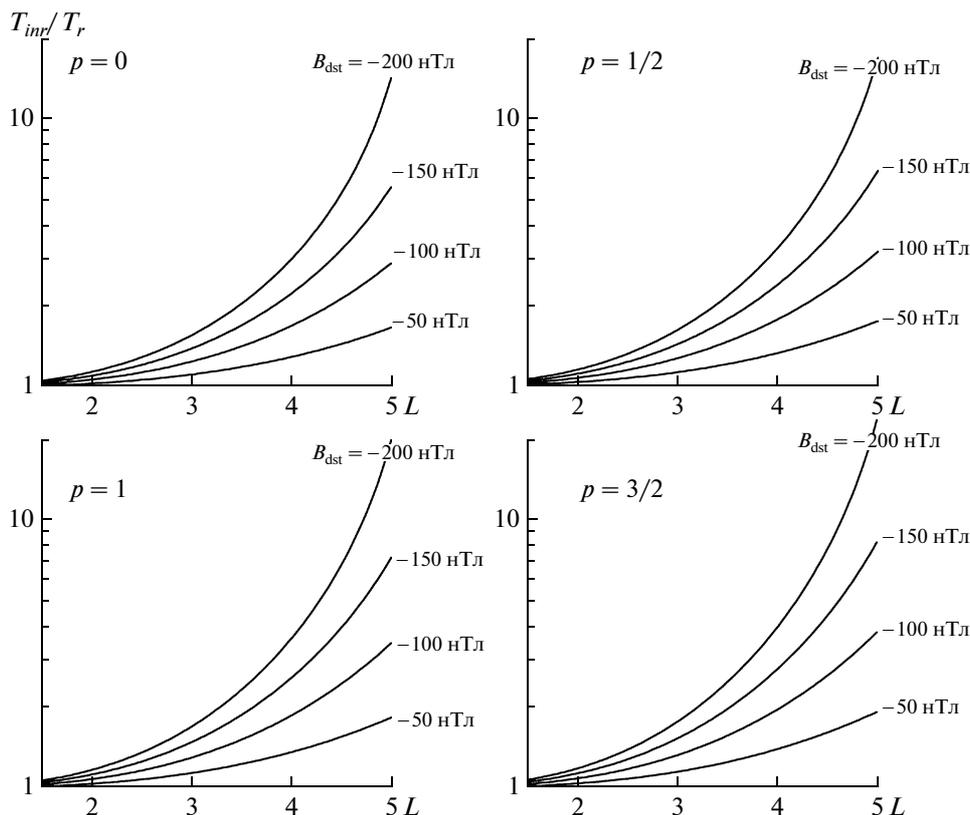


Рис. 4. Отношение начальной, соответствующей спокойным геомагнитным условиям, температуры протонов, находящихся на расстоянии r от центра Земли в экваториальной плоскости, к температуре протонов на том же расстоянии после воздействия магнитного возмущения B_{dst} различной величины (соотношение, обратное (17)). Различные панели соответствуют разным показателям степени p начального профиля температуры.

температуру, по формуле (14) определялась начальная оболочка $L_{in} = r_{in}/r_e$, откуда стартовали наблюдавшиеся на L протоны. Затем, используя измеренную перед магнитной бурей температуру протонов на оболочке L_{in} , по формуле (15) рассчитывалась температура T_r на оболочке L .

В этих расчетах величина B_{dst} определялась по значениям ежеминутных индексов $SYMH$ и $ASYH$. Во время магнитной бури возмущение магнитного поля во внутренней магнитосфере в основном связано с околоземным кольцевым током. Инжекция сравнительно горячей плазмы плазменного слоя на главной фазе бури создает частичный кольцевой ток с ночной стороны, максимум интенсивности которого постепенно смещается на запад [Brandt, 2002]. Так как интенсивность кольцевого тока во время магнитной бури обычно больше в вечерние и ночные часы местного времени, можно ожидать, что дополнительный дрейф протонов от Земли больше в вечерние и ночные часы. Для оценки возмущения магнитного поля над ночной стороной Земли мы использовали величину $B_{dst} = SYMH - ASYH/2$, по абсолютной величине большую, чем Dst ($SYMH$), а для дневной стороны $-B_{dst} = SYMH + ASYH/2$.

В расчетах и для панели 2, и для панели 3, представленных на рис. 5, использовалась величина $B_{dst} = -55$ нТл. Видно достаточно хорошее согласие измеренных значений температур протонов во время небольшой магнитной бури в период близкий к минимуму Dst -индекса и величин температур, рассчитанных в приближении дрейфа протонов в экваториальной плоскости по начальным значениям температуры, измеренным до магнитной бури. Отметим, что измерения на Магионе-5 на рассматриваемых пролетах проводились действительно вблизи плоскости геомагнитного экватора.

На рис. 6 представлены распределения плотности и температуры протонов, измеренные на ИНТЕРБОЛ-2 22–23 октября 1996 г. вблизи геомагнитного экватора в позднем вечернем секторе. Тонкими линиями на панелях 3 и 4 показаны профили температуры, пересчитанные по начальному профилю температуры T_{in} панели 1 при $B_{dst} = SYMH - ASYH/2 = -130$ нТл и -85 нТл, соответственно. Согласие измеренных и рассчитанных профилей вполне удовлетворительное.

В отличие от рассмотренных двух примеров измерений вблизи экваториальной плоскости

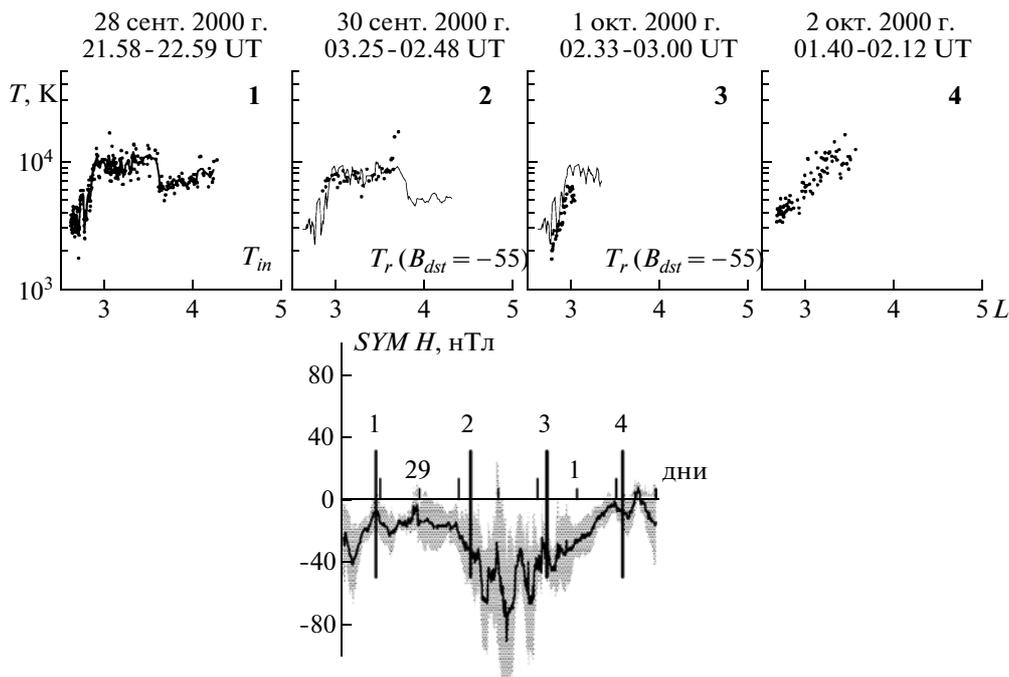


Рис. 5. То же, что и на рис. 1, но тонкие сплошные линии на температурных графиках 2 и 3 – профили температур, рассчитанные в приближении дрейфа протонов в экваториальной плоскости по начальному профилю 1 (T_{in}) при $B_{dst} = -55$ нТл. Внизу показаны вариации $SYM H$ -индекса. Заштрихована область $SYM H \pm ASYM/2$.

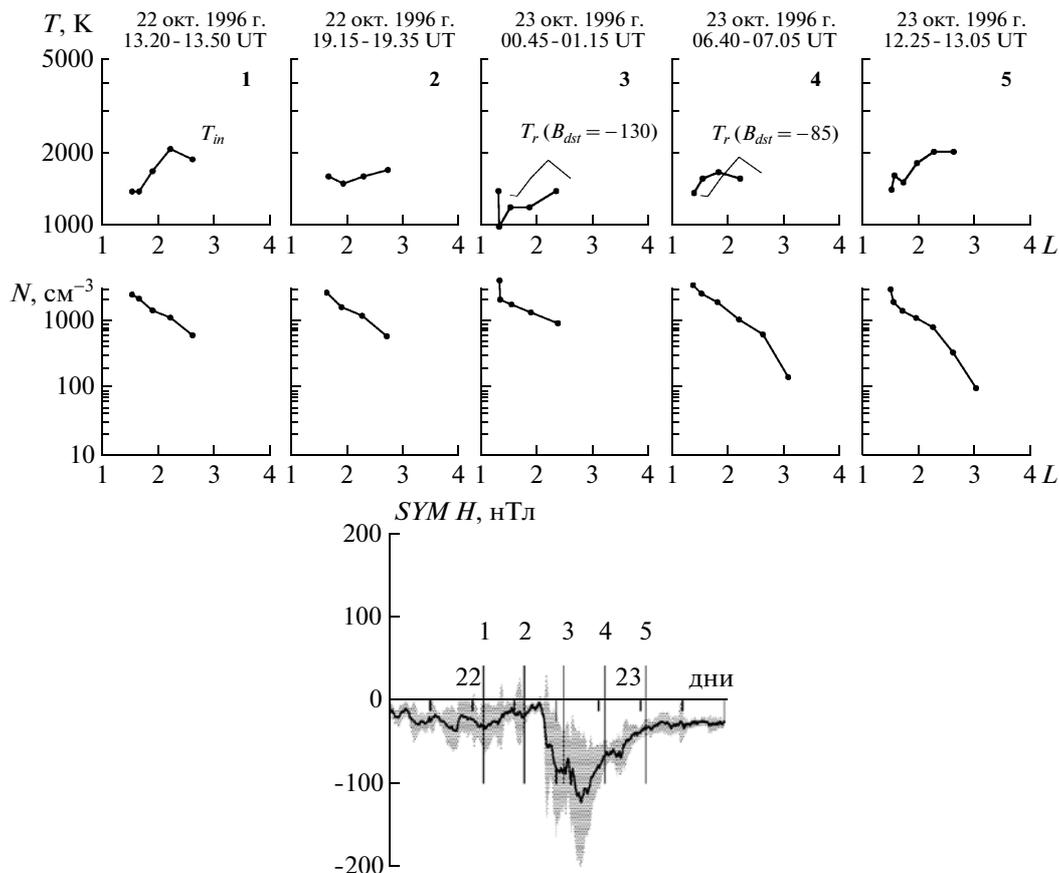


Рис. 6. То же, что и на рис. 2 для 22–23 октября 1996 г. 20.1–22.5 MLT. Геомагнитная широта – -20° – $+20^{\circ}$. Тонкие линии на температурных графиках 3 и 4 – профили температуры, рассчитанные в приближении дрейфа протонов в экваториальной плоскости по начальному профилю 1 (T_{in}) при $B_{dst} = -130$ нТл и -85 нТл, соответственно.

Случаи пересечений плазмосферы во время геомагнитных бурь

Дата/время – до бури (UT)	Дата/время – во время бури (UT)	L	MLT	$\lambda_{\text{геом}}$	SYMН (нТл)	ASYН (нТл)	B_{dst} (нТл)	$T_{\text{инг}}$ (К)	$T_{r, \text{набл}}$ (К)	T_r (К)	L_{in}	T_{in} (К)
05.10.1999/09.00	13.10.1999/08.02	2.65	8.99	0.15°	-41	59	-41	3500	2300	2600	2.62	2800
06.11.1999/04.59	14.11.1999/04.00	2.80	6.50	2.3°	-73	32	-73	5550	4300	4550	2.73	5200
03.09.2000/03.35	05.09.2000/01.49	2.80	3.90	2.8°	-31	17	-31	4500	3100	3400	2.77	3600
24.09.2000/03.10	26.09.2000/01.27	2.70	2.00	2.6°	-45	46	-68	3700	3500	3100	2.64	3200
28.09.2000/22.30	30.09.2000/03.44	3.00	1.80	9.1°	-37	36	-55	9500	7400	7600	2.94	8600
28.09.2000/22.50	01.10.2000/02.57	2.80	1.70	3.1°	-39	30	-54	3700	2600	2900	2.75	3200
09.11.2000/21.50	10.11.2000/21.03	2.80	22.00	4.0°	-65	10	-70	3500	2900	2700	2.73	3200
26.11.2000/19.01	29.11.2000/22.18	2.77	20.50	1.5°	-72	18	-72	6200	5800	5000	2.71	5700
04.03.2001/10.55	05.03.2001/10.04	2.70	12.00	-2.0°	-42	41	-21	5700	5000	5200	2.68	5300
18.03.2001/10.20	20.03.2001/08.50	2.75	10.50	0.8°	-139	84	-97	6400	4100	5200	2.66	6100
22.03.2001/12.50	28.03.2001/07.38	3.00	10.00	8.5°	-37	22	-26	5900	4200	5100	2.97	5400
30.03.2001/05.45	31.03.2001/04.55	3.25	9.3	8.5°	-64	88	-64	5700	3200	3700	3.14	4150

плазмосферы Земли, на рис. 2 (см. выше) представлены данные ИНТЕРБОЛ-2, полученные на более высоких широтах. Тонкой сплошной линией на температурном графике панели 3 рис. 2 показан профиль температуры, рассчитанный в приближении дрейфа протонов в экваториальной плоскости по начальному профилю 1 (T_{in}) при $B_{\text{dst}} = -80$ нТл. Такое значительное дополнительное переменное магнитное поле, хотя и ведет к заметному понижению температуры относительно начальной, не приводит к согласию экспериментального и теоретического профилей температуры, соответствующих периоду вблизи минималь-

ного значения Dst . Возможно, расхождение связано с тем, что измерения на ИНТЕРБОЛ-2 в этих пролетах через плазмосферу велись на геомагнитных широтах существенно больше экваториальных, и здесь работает какой-то дополнительный механизм охлаждения плазмы.

О небольшом (~10%) уменьшении температуры дневной плазмосферы при повышенной магнитной активности сообщалось Безруких и др. [2003, 2006] по данным ИНТЕРБОЛ-2.

Всего для спутника МАГИОН-5 найдено 12 случаев пересечений плазмосферы во время геомагнитных бурь, когда имелись данные о температуре протонов. Информация по этим пересече-

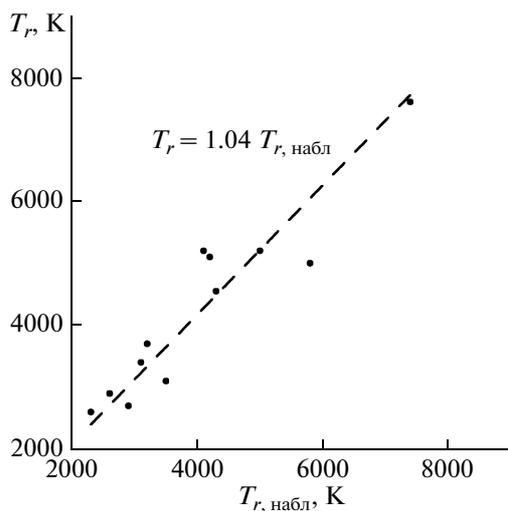


Рис. 7. Сравнение температуры в плазмосфере, наблюдавшейся во время геомагнитных бурь на спутнике Магион-5 вблизи геомагнитного экватора, с температурой, рассчитанной на основе значений, измеренных до начала бури. Пунктирная линия – зависимость $T_r = 1.04 T_{r, \text{набл}}$.

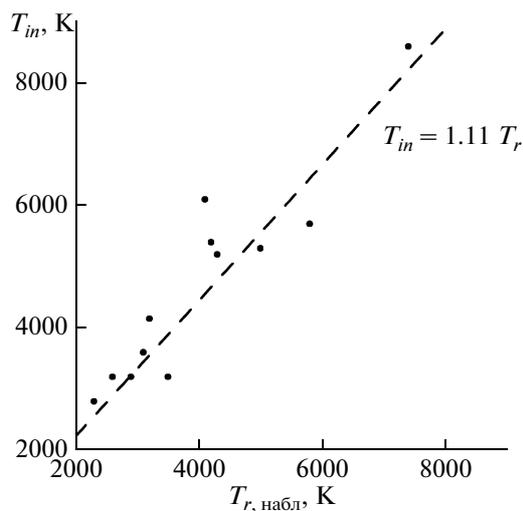


Рис. 8. Сравнение начальной температуры протонов на начальной L -оболочке до магнитной бури с конечной температурой на конечной оболочке во время бури. Пунктирная линия – зависимость $T_{\text{in}} = 1.11 T_{r, \text{набл}}$.

ниям представлена в таблице. Для каждого из этих пролетов спутника для анализа и расчетов по формулам (14, 15) была выбрана одна L -оболочка, расположенная возможно глубже в плазмосфере. Используемые значения L изменялись в диапазоне 2.65–3.25. При этом геомагнитная широта $\lambda_{\text{геом}}$ менялась в диапазоне -2° – $+9^\circ$, то есть вблизи магнитного экватора, а местное время было произвольным.

На рис. 7 сопоставлены температуры протонов, наблюдавшиеся в период вблизи минимума Dst во время магнитных бурь $T_{r, \text{набл}}$, с температурами T_r , рассчитанными на тех же L -оболочках по температурам, зарегистрированным до начала бури. Из рис. 7 видно, что согласие рассчитанных и измеренных температур очень хорошее – $T_r = 1.04T_{r, \text{набл}}$, с коэффициентом детерминации $R^2 = 0.987$. Между тем, небольшое превышение рассчитанной температуры T_r над наблюдаемой $T_{r, \text{набл}}$, может говорить о наличии дополнительного механизма охлаждения плазмы, менее выраженного на экваториальных широтах, чем на более высоких (см. рис. 2).

На рис. 8 по тем же 12 пролетам через плазмосферу спутника МАГИОН-5 показана зависимость температуры, измеренной в спокойных геомагнитных условиях T_{in} от температуры, наблюдавшейся во время магнитной бури $T_{r, \text{набл}}$. Величина T_{in} определялась для стартовой оболочки L_{in} , рассчитанной предварительно с помощью (14). Для выбранных 12 пересечений плазмосферы среднее значение $\langle L \rangle = 2.835$ и среднее значение $\langle B_{dst} \rangle = -56$ нТл и следуя (15), аппроксимирующая зависимость должна быть такой: $T_{in}(T_r) = 1.11T_r$. Эта зависимость показана пунктирной линией на рис. 8. Очевидно, что она достаточно хорошо аппроксимирует имеющиеся данные (коэффициент детерминации $R^2 = 0.984$), что также свидетельствует в пользу механизма охлаждения ионов во внутренней магнитосфере во время бури, связанного с дрейфом ионов от Земли при уменьшении магнитного поля в этой области.

Несколько слов теперь о динамике плотности плазмы во внутренней магнитосфере во время магнитных бурь. Во всех рассмотренных выше пролетах спутников ИНТЕРБОЛ-2 и МАГИОН-5 через плазмосферу во время магнитных бурь плотность во внутренней магнитосфере не уменьшалась на главной фазе бури: она либо оставалась на прежнем уровне, либо возрастала. Это не согласуется с весьма распространенным представлением об уменьшении плотности плазмы во внутренней не опустошенной части плазмосферы во время бури [Carpenter and Park, 1973; Spasojevic and Sandel, 2010]. Падение плотности плазмы во внутренней магнитосфере для рассмотренных в этой статье пролетов наблюдалось только на фазе восстановления, после прохождения минимума

Dst . Вообще по данным этих спутников падение плотности на главной фазе бури наблюдалось только при очень сильных магнитных бурях, сопровождающихся длительной авроральной активностью [Котова и др., 2008]. Ранее, возрастание плотности во внутренней плазмосфере наблюдали также Takasaki et al. [2006] при $L = 1.4$ по наземным данным во время главной фазы сильной магнитной бури 31 октября 2003 г. Возможной причиной увеличения плотности в плазмосфере авторы считали потоки тяжелых ионов O^+ из ионосферы в плазмосферу.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Измерения на спутниках ИНТЕРБОЛ-2 и МАГИОН-5 свидетельствуют о том, что во время главной фазы магнитных бурь температура ионов плазмосферы, как правило, понижается, плотность плазмы при этом повышается или сохраняется на прежнем уровне, характерном для невозмущенных условий.

Модель перемещения дрейфовой оболочки от Земли, вызванного уменьшением магнитного поля во внутренней плазмосфере при развитии магнитной бури, удовлетворительно описывает понижение температуры протонов вблизи экваториальной плоскости.

Для объяснения большего уменьшения температуры в плазмосфере на более высоких широтах необходимо привлекать другие механизмы.

Работа выполнена при частичной поддержке программ П16 и ОФН15 РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Безруких В.В., Барабанов Н.А. и др. Исследование малознергичной плазмы на борту Хвостового и Аврорального зондов: Аппаратура и предварительные результаты // Космич. исслед. Т. 36. С. 33–41. 1998.
- Безруких В.В., Котова Г.А., Лежен Л.А., Лемер Ж., Пиерар В., Венедиктов Ю.И. Динамика температуры и концентрации холодных протонов плазмосферы Земли, связанная с геомагнитными возмущениями по данным эксперимента Авроральный зонд/Альфа-3 // Космич. исслед. Т. 41. С. 417–427. 2003.
- Безруких В.В., Котова Г.А., Веригин М.И., Шмиллауэр Я. Тепловая структура дневной плазмосферы по данным Хвостового и Аврорального зондов и спутника Магион-5 // Космич. исслед. Т. 44. № 5. С. 428–437. 2006.
- Котова Г.А. Плазмосфера Земли. Современное состояние исследований (Обзор) // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 47. № 4. С. 435–449. 2007.
- Котова Г.А., Веригин М.И., Безруких В.В. Вариации физических характеристик плазмосферы Земли в магнитоактивные периоды // Сб. докл. IV междунар. конф. “Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений”. 14–17 августа 2007 г. с. Паратунка Камчатской обл., Дальневосточное отделение

- РАН, Институт космических исследований и распространения радиоволн, Петропавловск-Камчатский, ISBN 5-7442-1446-1. С. 55–59. 2007.
- *Котова Г.А., Безруких В.В., Веригин М.И., Акентьева О.С., Шмилауэр Я.* Исследование каверн плотности в плазмосфере Земли по данным спутника МАГИОН-5 // *Космич. исслед.* Т. 46. № 1. С. 17–26. 2008.
 - *Редерер Х.* Динамика радиации, захваченной геомагнитным полем. М.: Мир, 192 с. 1972.
 - *Brandt P.C., Ohtani S., Mitchell D.G., Fok M.-C., Roelof E.C., Demajstre R.* Global ENA observations of the storm main-phase ring current: Implications for skewed electric fields in the inner magnetosphere // *Geophys. Res. Lett.* V. 29. № 20. 1954. doi:10.1029/2002GL015160. 2002.
 - *Carpenter D.L., Park C.G.* On what ionospheric workers should know about the plasmopause – plasmasphere // *Rev. Geophys. Space Phys.* V. 11. P. 133–154. 1973.
 - *Comfort R.H.* Thermal structure of the plasmasphere // *Adv. Space Res.* V. 17. P. (10)175–(10)184. 1996.
 - *The Earth's Plasmasphere. A CLUSTER and IMAGE perspective.* *Darrouzzet F., De Keyser J., Pierrard V.* (editors). Springer. 296 p. 2009.
 - *Kotova G.A., Bezrukikh V.V., Verigin M.I., Lezhen L.A.* Temperature and density variations in the dusk and dawn plasmasphere as observed by INTERBALL TAIL in 1999–2000 // *Adv. Space Res.* V. 30. № 7. P. 1831–1834. 2002.
 - *Kotova G., Bezrukikh V., Verigin M., Smilauer J.* New aspects in plasmaspheric ion temperature variations from INTERBALL 2 and MAGION 5 measurements // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 70. № 2–4. P. 399–406. 2008.
 - *Lemaire J.F., Gringauz K.I. with contribution from Carpenter D.L. and Bassolo V.* *The Earth's Plasmasphere.* Cambridge University Press. 350 p., 1998.
 - *Spasojevic M., Sandel B.R.* Global estimates of plasmaspheric losses during moderate disturbance intervals // *Ann. Geophys.* V. 28. P. 27–36. 2010.
 - *Takasaki I S., Kawano H., Tanaka Y., Yoshikawa I A., Seto M., Iizima M., Obana Y., Sato N., Yumoto K.* A significant mass density increase during a large magnetic storm in October 2003 obtained by ground-based ULF observations at $L \sim 1.4$ // *Earth Planets Space.* V. 58. P. 617–622. 2006.