

УДК 551.510.537

РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕПЛОВЫХ ПРОТОНОВ В ПЛОСКОСТИ МАГНИТНОГО ЭКВАТОРА ПЛАЗМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ИНТЕРБОЛ-1

© 2022 г. Г. А. Котова¹, *, В. В. Безруких¹¹Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия

*e-mail: kotova@iki.rssi.ru

Поступила в редакцию 28.02.2022 г.

После доработки 25.04.2022 г.

Принята к публикации 25.05.2022 г.

По измерениям холодной (<1 эВ) плазмы во внутренней магнитосфере Земли определялись плотность и температура протонов, а также потенциал космического аппарата, с помощью широкоугольного анализатора, работавшего на космическом аппарате ИНТЕРБОЛ-1. Анализировались значения этих величин, зарегистрированные вблизи плоскости геомагнитного экватора. Получены количественные выражения для распределения плотности и температуры протонов в плоскости магнитного экватора плазмосферы во всем диапазоне параметра Мак-Иллвайна L (расстояние до центра Земли в радиусах Земли в экваториальной плоскости). Температура протонов в плазмосфере существенно зависит от локального времени и определяется, в основном, температурой плазмы в нижележащей ионосфере. Скорость возрастания температуры протонов в плазмосфере относительно температуры электронов в ионосфере зависит от фазы цикла солнечной активности.

DOI: 10.31857/S0016794022050066

1. ВВЕДЕНИЕ

За много лет исследования плазмосферы Земли, прямых измерений плотности и температуры тепловых протонов проведено очень мало [Котова, 2007]. Распределения плотности в глубине плазмосферы в экваториальной плоскости получены, главным образом, по измерениям вистлеров [Carpenter, 2004, и ссылки там], вне этой плоскости — по волновым измерениям на различных космических аппаратах [Gurnett et al., 1995; Reinisch et al., 2000; Sheley et al., 2001 и др.]. В отличие от плотности, температура ионов может быть измерена только в прямых экспериментах, и поэтому массив данных о температуре плазмы в плазмосфере более ограничен. Наиболее полные данные были получены с помощью широкоугольных масс-спектрометров с тормозящим потенциалом RIMS на космических аппаратах Dynamic Explorer DE-1 и DE-2 [Comfort, 1986, 1996]. По этим данным подробно изучена динамика температуры протонов на утренней и вечерней сторонах плазмосферы. Более современные исследования, например, на спутниках CLUSTER проводились только на внешних магнитных оболочках плазмосферы на $L > 4$ [Darrouzet et al., 2009].

В первых работах по данным ИНТЕРБОЛА-1 [Kotova et al., 2002a, б] рассматривались все полученные данные о плотности (N) и температуре (T)

протонов во внутренней магнитосфере между магнитными оболочками $L \sim 2$ и $L \sim 5$ (L — параметр Мак Иллвайна). Отмечалось увеличение температуры с ростом L и возрастание температуры с локальным временем от полуночи к полудню. Падение плотности с увеличением L оценивалось, как $N \sim L^{-\alpha}$, $\alpha = 3.7\text{--}4.0$. В этих работах не делалось различия между плазмосферой и пограничным слоем плазмосферы и пренебрегалось зависимостью плотности от геомагнитной широты. Следует отметить, что область магнитосферы Земли выше ионосферы, в которой доминирующую роль играет холодная плазма с энергией менее 1–2 эВ, делится на область собственно плазмосферы и пограничный слой плазмосферы. Пограничным слоем плазмосферы называется область толщиной от $0.1 L$ до $1.5 L$, заполненная холодной плазмой и примыкающая к плазмопаузе (определение плазмопаузы рассмотрено в конце раздела 2) с ее внешней стороны. Плотность плазмы в этой области спадает экспоненциально с увеличением L [Carpenter and Lemaire, 2004; Kotova et al., 2018].

Наиболее подробно плотность электронов в плазмосфере при $L > 2$ проанализирована в работе [Carpenter, Anderson, 1992] по данным исследования вистлеров и данным волнового эксперимента на спутнике ISEE-1. Авторами определен

профиль плотности электронов “насыщенной” плазмосферы. Распределение плотности электронов в плазмосфере и в “провале” вне плазмосферы на $L > 3$ анализировалось по данным о частоте верхнего гибридного резонанса, полученным на спутнике CRRES [Sheeley et al., 2001]. На более глубоких L -оболочках измерения не проводились. Распределение плотности электронов в экваториальной плоскости и вдоль магнитных силовых линий рассматривалось также в работе [Denton et al., 2004] по волновым измерениям на спутнике POLAR. Модели плотности электронов и массовой плотности ионов в экваториальной плоскости, выполненные по наземным измерениям и волновым данным прибора RPI космического аппарата IMAGE, были представлены в работе [Verube et al., 2005]. В этой работе также не делалось различия между плазмосферой и пограничным слоем плазмосферы.

В настоящее время разработано достаточно много эмпирических [например, Reinisch et al., 2009] и физических моделей плазмосферы [Piergard et al., 2009], но все они требуют значительных вычислений и плохо подходят для быстрых оценок средней плотности и температуры тепловой плазмы, которые часто необходимы для анализа физических процессов в околоземном пространстве: распространения различных волн, оценок заряда космического аппарата и т.д.

Целью настоящей работы является получение аналитических выражений для описания распределения плотности и температуры протонов в плоскости магнитного экватора, а также анализ скорости увеличения температуры протонов в плазмосфере относительно температуры электронов в ионосфере.

2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Напомним, что спутник ИНТЕРБОЛ-1 был запущен 3 августа 1995 г. на орбиту с параметрами: апогей $\sim 200\,000$ км, перигей ~ 500 км, наклонение 63.8° и период обращения вокруг Земли ~ 90 ч. В начальный период после запуска спутник достигал внутренней L — оболочки $L_{\min} \sim 1.4$. Позднее, в результате эволюции орбиты, ее перигей поднялся, и в 1997–1998 г. спутник только изредка попадал в плазмосферу и регистрировал холодную плазму. Например, 27 декабря 1997 г. минимальное расстояние от центра Земли до спутника на орбите (перигей орбиты) было $R_{\min} = 4.77 R_E$ (R_E — радиус Земли), а $L_{\min} \sim 4.92$. С 1999 г. и до конца активной работы спутника перигей орбиты понижался. На каждой орбите спутника ИНТЕРБОЛ-1 минимальные значения L наблюдались вблизи магнитного экватора, и это позволяет проанализировать динамику параметров хо-

лодной плазмы в плоскости магнитного экватора в зависимости от L . Для измерения тепловой плазмы на спутнике был установлен комплекс аппаратуры Альфа-3, включавший широкоугольный анализатор с тормозящим потенциалом ПЛ-48, данные которого и будут рассмотрены ниже. Спектры измерялись в течение 2 с с периодичностью от 30 с до 5 мин в зависимости от телеметрической моды.

Методика обработки данных и получения значений плотности, температуры и потенциала космического аппарата описана в работах [Безруких и др., 1998; Kotova et al., 2014]. В работе [Kotova et al., 2002a] температура протонов, полученная в утреннем и вечернем секторах плазмосферы на космическом аппарате ИНТЕРБОЛ-1, сравнивалась с температурой, измеренной в тех же секторах прибором DE-1/RIMS. Было продемонстрировано хорошее согласие температур. На рис. 1 аналогичное сравнение показано для значений плотности протонов. Плотность протонов, полученная по данным DE-1/RIMS (крестики на рис. 1), усреднялась по интервалам $\Delta L = 0.2$ (рис. 6 в работе [Comfort et al., 1988]). Приведены также допустимые интервалы изменения средних значений плотности, равные одному стандартному отклонению значений при усреднении. Из всех данных ИНТЕРБОЛа-1 для сравнения отбирались данные по магнитному локальному времени (точки на рис. 1) в соответствии с интервалами времени, выбранными для данных DE-1. Ни данные DE-1, ни данные ИНТЕРБОЛа-1 не разделялись по уровню геомагнитной активности. Рисунок 1 демонстрирует хорошее согласие значений плотности, рассчитанных по данным DE-1, полученным в 1981 г., и по данным ИНТЕРБОЛа-1, полученным в 1995–2000 г. Наблюдающаяся немного меньшая плотность плазмы в плазмосфере при $L < 3$ по данным ИНТЕРБОЛа-1, чем по данным DE-1, вероятно, связана с различным средним уровнем геомагнитной возмущенности во время наблюдений [Park et al., 1978; Котова, 2007]. В период измерений на DE-1 магнитная активность в среднем была повышенной [Comfort et al., 1988], в то время, как измерения на ИНТЕРБОЛе-1 по большей части относятся к периодам слабой и умеренной геомагнитной активности. Следует отметить, что значимых различий между плотностью протонов на утренней стороне плазмосферы и на вечерней ни по данным DE-1, ни по данным ИНТЕРБОЛ-1 не обнаружено.

Еще одно свидетельство высокого качества данных было получено в работе [Kotova et al., 2014], где анализировалось значение электрического потенциала космического аппарата в зависимости от положения области оптической тени Земли. Потенциал космического аппарата является дополнительным свободным параметром, помимо плотности и температуры протонов, ко-

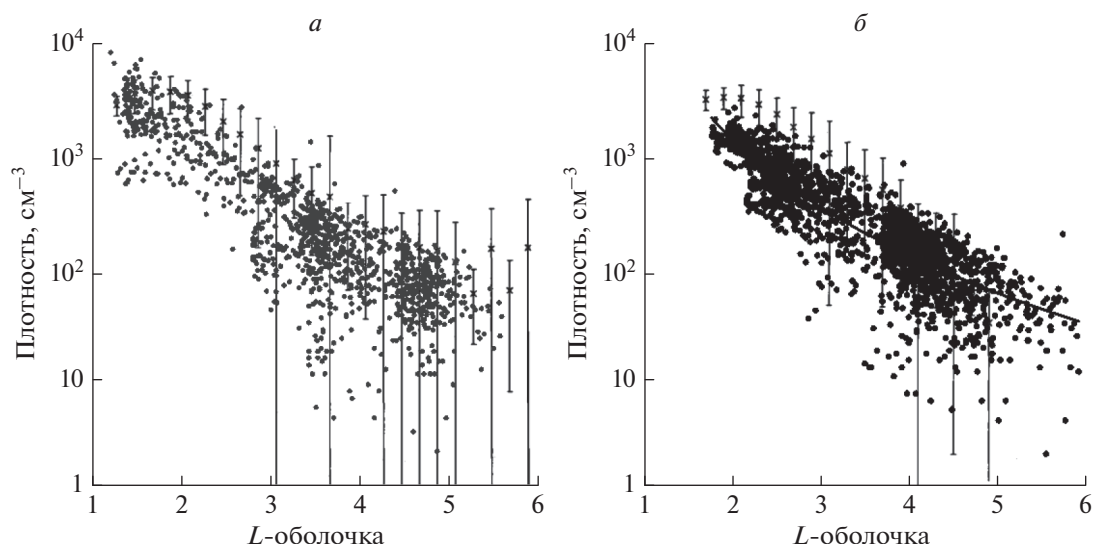


Рис. 1. Сравнение плотности протонов, измеренной на спутнике ИНТЕРБОЛ-1 (точки), со средними значениями плотности протонов, измеренной на спутнике DE-1 (крестики с допустимыми интервалами), в вечернем 18–22 ч (а) и утреннем 07–11 ч (б) – секторах плазмосферы.

торый удастся определить при обработке измеренных энергетических спектров протонов. Оказалось, что рассчитанный потенциал аппарата всегда резко падает при входе спутника в оптическую тень планеты. Это безусловно подтверждает правильность рассчитанных характеристик плазмы.

Для дальнейшего анализа данных для каждого пролета спутника через магнитосферу выбирались и усреднялись измерения вблизи плоскости геомагнитного экватора в интервале изменения геомагнитной широты λ : $-7^\circ < \lambda < +7^\circ$. Также учитывались только измерения внутри плазмосферы, т.е. значение L , соответствующее измерениям вблизи геомагнитного экватора, должно быть меньше магнитной оболочки плазмосферы L_p , которая определялась по критерию работы [Carpenter, Anderson, 1992]: внутренняя граница области, где плотность плазмы падает в 5 или более раз при изменении L на 0.5. В случаях, когда плотность падает постепенно с увеличением L , принималась во внимание величина L_p , полученная при моделировании [Веригин и др., 2012, Kotova et al., 2015]. В указанных работах представлена полуэмпирическая физическая модель плазмосферы Земли, позволяющая по данным измерений холодной плазмы вдоль одного пролета спутника восстановить распределение плазмы во всей плазмосфере и определить положение плазмосферы. В модели использованы теоретические выражения, описывающие распределение плазмы в плазмосфере для случаев теплового равновесия и бесстолкновительного начального частичного заполнения плазмосферных оболочек. Плазмосфера определялась как последняя за-

мкнутая линия потока плазмы. В работе [Котова и др., 2017] было показано, что модельное положение плазмосферы приблизительно совпадает с L_p , определенным по описанному выше формальному критерию. Таким образом, был отобран массив данных о плотности и температуре протонов в плоскости геомагнитного экватора при различных значениях L , магнитного локального времени MLT и мирового времени UT.

3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ПРОТОНОВ В ПЛОСКОСТИ ГЕОМАГНИТНОГО ЭКВАТОРА

На рисунке 2а показана зависимость плотности протонов N (см^{-3}) из выбранного массива данных по измерениям на спутнике ИНТЕРБОЛ-1 в плоскости геомагнитного экватора плазмосферы от L -оболочки. Зависимость аппроксимирована кривой (черная линия):

$$N = 6500L^{-2.7}. \quad (1)$$

Коэффициент детерминации (R^2), полученной кривой, $R^2 = 0.85$, весьма высок. На рис. 2б показаны значения плотности протонов внутри плазмосферы, спроецированные на плоскость геомагнитного экватора вдоль соответствующих L -оболочек по модели [Веригин и др., 2012]. Эти значения плотности соответствуют тем пролетам спутника, когда данных было достаточно для восстановления плотности во всей меридиональной плоскости плазмосферы [Веригин и др., 2012]. Сплошной черной линией показана зависимость (1). В этом случае коэффициент детерминации $R^2 = 0.75$ также высокий. Таким образом,

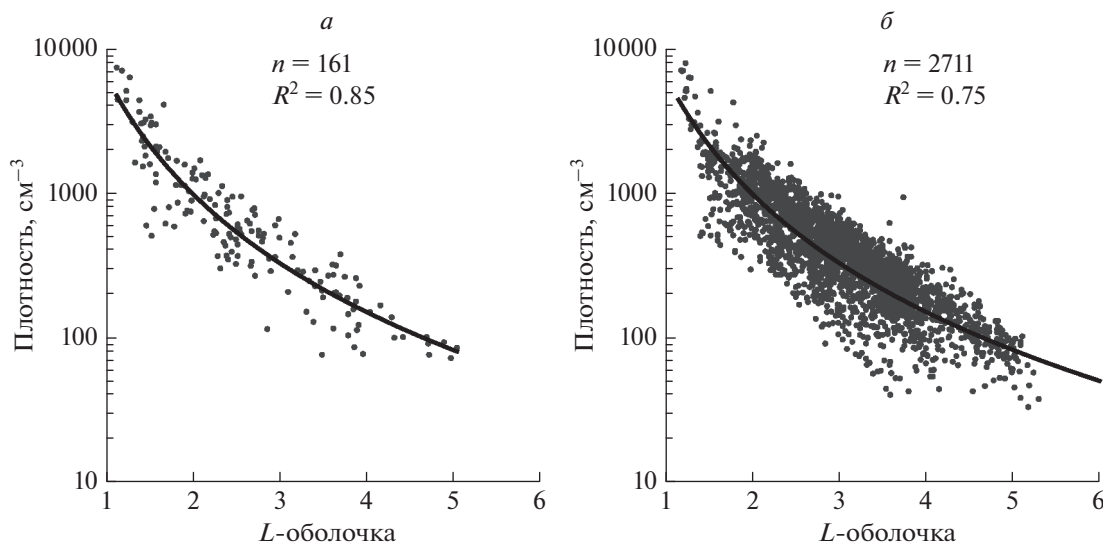


Рис. 2. Зависимость плотности протонов, измеренной на спутнике ИНТЕРБОЛ-1 в плоскости магнитного экватора плазмы (а), и плотности, измеренной в плазмосфере и спроецированной на плоскость магнитного экватора вдоль силовых линий магнитного поля (б), от расстояния до центра Земли в радиусах Земли. Указаны число точек (n) и коэффициент детерминации (R^2).

соотношение (1) хорошо описывает как данные полученные непосредственно в экваториальной плоскости, так и данные, спроецированные на эту плоскость.

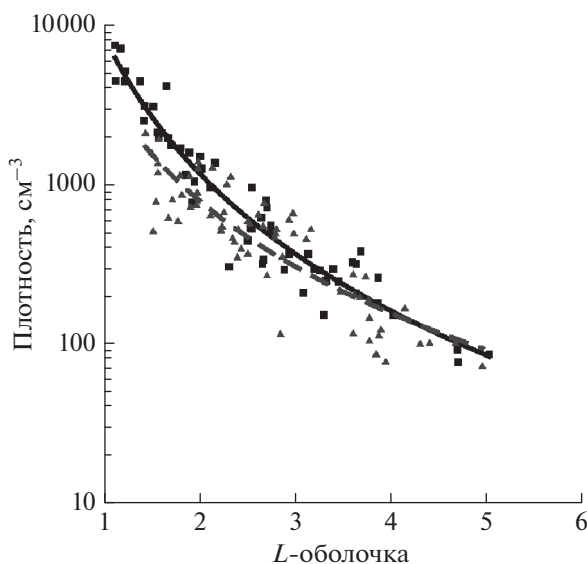


Рис. 3. Зависимость плотности протонов, измеренной на спутнике ИНТЕРБОЛ-1 в плоскости магнитного экватора плазмы, для двух интервалов MLT: дневные часы 09.00–18.00 (квадратики) и ночные часы 21.00–06.00 (треугольники). Соответствующие степенные аппроксимации: для квадратиков — сплошная линия, для треугольников — пунктирная линия.

Для анализа влияния магнитного локального времени (MLT) на зависимость плотности протонов в экваториальной плоскости на рис. 3 измерения разделены на 2 группы: выполненные днем с 09.00 MLT до 18.00 MLT (квадратики) и ночью с 21.00 MLT до 06.00 MLT следующего дня (треугольники). Значимого различия дневных и ночных зависимостей изменения плотности протонов с расстоянием от Земли в экваториальной плоскости не выявлено.

4. ВАРИАЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРОТОНОВ В ПЛОСКОСТИ ГЕОМАГНИТНОГО ЭКВАТОРА

Ранее по данным ИНТЕРБОЛА-1 было показано, что, в отличие от плотности, температура протонов существенно зависит от локального времени измерений [Kotova et al., 2002a]. Поэтому на рис. 4 зависимости измерений температуры от L рассмотрены для тех же двух временных интервалов, что и на рис. 3. Измерения, проведенные днем с 09.00 MLT до 18.00 MLT (квадратики) и ночью с 21.00 MLT до 06.00 MLT следующего дня (треугольники). Очевидно, что температура днем выше, чем ночью.

Получены следующие степенные зависимости, описывающие увеличение температуры T (К) с ростом L в плоскости магнитного экватора:

$$\text{для дневного времени} - T = 4200L^{0.42}, \quad (2)$$

$$\text{для ночного времени} - T = 3700L^{0.38}. \quad (3)$$

Коэффициент детерминации для зависимости (2) $R^2 = 0.64$ достаточно высокий, для зависимости (3) похуже $R^2 = 0.315$. Видно, что температура возрастает к плазмопаузе с увеличением расстояния от Земли, и температура протонов днем в среднем выше на 15–20%, чем ночью.

Вообще говоря, температура в плазмосфере существенно определяется температурой ниже лежащей ионосферы. В работе [Kotova et al., 2008] температура протонов в плазмосфере, полученная по данным спутника МАГИОН-5, сравнивалась с температурой электронов в верхней ионосфере на высоте 840–860 км по данным спутников DMSP F12–F15. Рассматривались вариации этого отношения температур в зависимости от магнитного локального времени. Следует отметить, что высота перигея орбиты спутника МАГИОН-5 почти не изменялась, и плоскость геомагнитного экватора пересекалась этим спутником при близких значениях параметра L , но при разных локальных временах. Напротив, высота перигея орбиты спутника ИНТЕРБОЛ-1 все время изменялась, и это дает возможность рассмотреть зависимость отношения температур в плазмосфере и ионосфере в зависимости от L (рис. 5а). Отношение температур определялось аналогично тому, как это делалось в работе [Kotova et al., 2008]. Средняя вблизи экваториальной плоскости температура протонов в плазмосфере бралась из созданного массива данных, описанного выше в параграфе 2. Температура электронов выбиралась из данных по пролетам спутников DMSP F12–F15 (<http://cedar.openmadrigal.org/list>) на L -оболочке, которая соответствует измерениям ИНТЕРБОЛа-1, разница в MLT составляла не более 4-х ч, максимальная разница в UT составляла 2 ч. Средние значения отличия по временам MLT и UT составляли 1.4 ч и 45 мин, соответственно. Разницы между южным и северным полушариями не делалось. Если находилось несколько подходящих измерений в ионосфере, выбиралась температура электронов в ближайшей по времени и пространству точке к подножию силовой линии, на которой проводились измерения в плазмосфере.

Из рисунка 5а виден общий тренд увеличения отношения температур с расстоянием от Земли в экваториальной плоскости, но одновременно очевидно разделение данных по годам на 2 ветви. Отношение температур протонов в плазмосфере к температуре электронов в верхней ионосфере в годы высокой солнечной активности (рис. 5б) 1999–2000 г. растет с L гораздо быстрее, чем в годы низкой солнечной активности 1995–1997 г. Отношения температур, рассмотренные ранее по данным МАГИОНа-5, полученным в 1999–2001 гг. для $L = 2.5–2.8$ и $L = 3.0–3.1$ (рис. 3 в работе [Kotova et al., 2008]) соответствуют аналогичным отношениям, полученным по данным

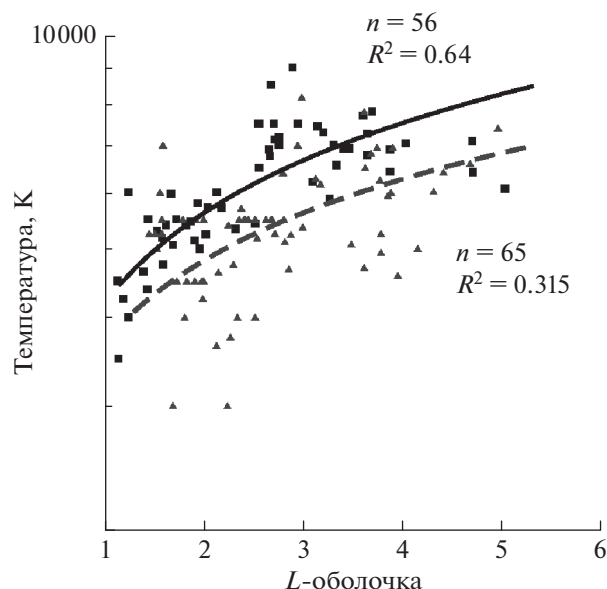


Рис. 4. Зависимость температуры протонов, измеренной на спутнике ИНТЕРБОЛ-1 в плоскости магнитного экватора плазмосферы, для двух интервалов MLT: дневные часы 09.00–18.00 (квадратики) и ночные часы 21.00–06.00 (треугольники). Соответствующие степенные аппроксимации: для точек — сплошная линия, для треугольников — пунктирная линия.

ИНТЕРБОЛа-1 в годы высокой солнечной активности (звездочки на рис. 5а).

Тесная связь температуры в плазмосфере с температурой в ионосфере, а точнее с освещенностью ионосферы Солнцем, была продемонстрирована в работе [Kotova et al., 2014]. Тем не менее, приведем рис. 6, наглядно показывающий, что температура протонов в плазмосфере связана с освещенностью ионосферы в ближайшем основании силовой линии, на которой проводились измерения в плазмосфере, и не зависит от освещенности дальнего основания силовой линии. На рисунке 6 показаны температуры протонов, рассчитанные по данным спутника ИНТЕРБОЛ-1 и усредненные по 5-градусным интервалам зенитного угла основания силовой линии в ионосфере на высоте 200 км. На рисунке 6а рассматривается зенитный угол основания силовой линии, ближайшего к тому месту на силовой линии, где проводились измерения в плазмосфере ($zen1$). На рисунке 6б рассматривается зависимость от зенитного угла дальнего основания ($zen2$). Видно, что с уменьшением $zen1$ и приближением к области оптической тени в ближайшем основании силовой линии температура в плазмосфере уменьшается, напротив, от $zen2$ температура протонов в плазмосфере не зависит.

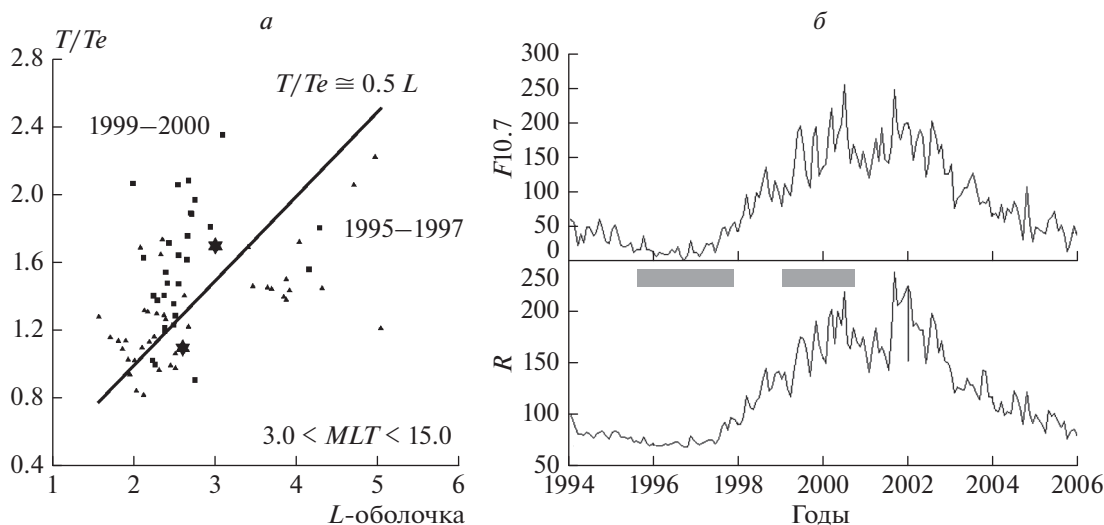


Рис. 5. (а) Изменение отношения температуры протонов, измеренной на спутнике ИНТЕРБОЛ-1 в плоскости магнитного экватора плазмосферы, к температуре электронов в верхней ионосфере по данным спутников DMSP F12–15 (<http://cedar.openmadriral.org/list>) в зависимости от L в 1995–1997 г. (треугольники) и в 1999–2000 г. (квадратики). Сплошная линия — общая аппроксимационная зависимость. (б) Вариации числа солнечных пятен R и индекса $F10.7$ (10^{-22} Вт м^{-2} Гц $^{-1}$) в 1994–2005 г. (OMNIWeb Data Explorer (nasa.gov)). Серые прямоугольники на рис. 5б отмечают периоды измерений в плазмосфере на спутнике ИНТЕРБОЛ-1.

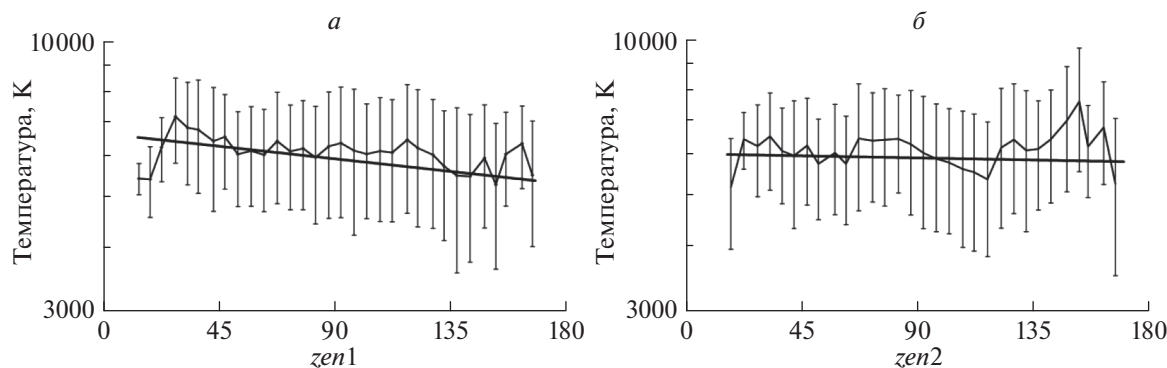


Рис. 6. Изменение средней температуры протонов (ломаные линии), измеренной на спутнике ИНТЕРБОЛ-1 в плазмосфере, в зависимости от зенитных углов основания силовой линии, на которой проводились измерения в ионосфере на высоте 200 км над Землей: (а) — зависимость от зенитного угла основания силовой линии, ближайшего к точке измерения, (б) — от зенитного угла дальнего основания силовой линии. Прямые линии — аппроксимирующие зависимости.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Простую зависимость (1) плотности протонов в плоскости геомагнитного экватора от расстояния до центра Земли (L -оболочки) необходимо сравнить с полученными ранее эмпирическими зависимостями (рис. 7). При этом следует иметь в виду, что подавляющее большинство количественных зависимостей строились для плотности электронов в плазмосфере. Сопоставлять эти зависимости с распределением плотности протонов можно предполагая квазинейтральность плазмы и, строго говоря, только зная состав ионов в плазмосфере. Данные спутника DE-1 позволили оце-

нить ионный состав плазмосферы [Comfort et al., 1988; Craven, 1997]. Было показано, что на расстояниях от Земли больше двух ее радиусов в экваториальной плоскости содержание однозарядного гелия постепенно уменьшается, начиная с величин 10–20% от содержания ионов водорода, а содержание альфа-частиц и более тяжелых ионов составляет от долей до нескольких процентов. Аналогичные оценки содержания ионов гелия и кислорода в плазмосфере были получены по данным космических миссий CLUSTER и IMAGE [Darrouzet et al., 2009]. Таким образом, оцениваемая по волновым измерениям плотность элек-

тронов может превышать плотность протонов на 10–20%.

В работе [Carpenter, Anderson, 1992] выражением $N_e = 10^{(-0.3145L + 3.9043)}$ был аппроксимирован “профиль насыщения” плазмосферы, который определялся для геомагнитной широты в пределах 30° от экваториальной плоскости $-30^\circ < \lambda < 30^\circ$ в условиях длительного геомагнитно спокойного периода. Рассматривались гладкие бесструктурные профили и такие, в которых при $L = 3$ плотность была больше 1000/1.5. Естественно, вследствие специального отбора профилей плотности, полученный средний профиль плотности насыщения электронов более пологий, чем полученный в настоящей работе и других работах, и оцененная плотность насыщения близка к максимальной на данных магнитных оболочках.

По волновым данным спутника CRRES [Sheeley et al., 2001] для плотности электронов в плазмосфере в интервале $3 < L < 7$ была получена следующая формула: $N_e = 1390(3/L)^{4.8} \pm 440(3/L)^{3.6}$. Относятся ли рассматриваемые данные к плазмосфере или к области провала определялось по величине плотности на данной L -оболочке. Плотности выше выбранного критерия — $N_k = 10(6.6/L)^4$ — считались относящимися к плазмосфере, ниже к провалу. Это означает, что некоторая зависимость от L предполагалась с самого начала. По-видимому, пограничный слой плазмосферы относился иногда к плазмосфере, иногда к внешней области провала.

При анализе данных волнового эксперимента PWI на космическом аппарате POLAR плотность электронов, полученная вдали от экваториальной плоскости, переносилась на экватор с использованием выведенной авторами ранее формулы для изменения плотности вдоль магнитной силовой линии [Denton et al., 2004]. Рассматривались данные на $L > 2.5$ и разделялись на принадлежащие плазмосфере или “провалу” — области за плазмосферой — визуально. При этом профили с постепенно спадающей плотностью принимались за плазмосферные, если на больших расстояниях от Земли $L > 3$ плотность электронов была выше 300 см^{-3} . Такой отбор профилей в плазмосфере приводит к завышению плотности электронов в области $L \sim 3$.

На рис. 7 показана также зависимость, полученная [Verube et al., 2005] с помощью наземных волновых экспериментов. Эта зависимость соответствует нижней границе профиля [Sheeley et al., 2001]. Представленный на рис. 2 и 7 средний профиль плотности протонов по измерениям на космическом аппарате ИНТЕРБОЛ-1 в плоскости геомагнитного экватора проходит при $2 < L < 4$ несколько ниже профилей плотности электронов. По-видимому, отличие связано, главным образом, с различными методиками отбора данных, а

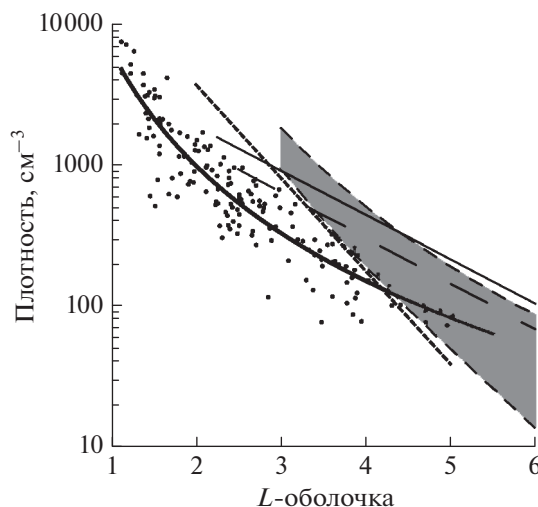


Рис. 7. Сравнение зависимости плотности протонов от L , измеренной на спутнике ИНТЕРБОЛ-1 в плоскости магнитного экватора плазмосферы (точки и сплошная жирная кривая (1)), с аналогичными зависимостями для плотности электронов. Сплошная тонкая линия — плотность насыщения, оцененная [Carpenter, Anderson, 1992], штриховые линии ограничивают область плотности электронов, полученную [Sheeley et al., 2001], линия из длинных штрихов — зависимость [Denton et al., 2004], пунктирная линия — зависимость [Verube et al., 2005].

также с различными способами переноса в экваториальную плоскость данных, полученных вне этой плоскости. Нельзя также забывать об отличии значений плотности электронов от плотности ионов из-за изменяющегося ионного состава плазмосферы. И, наконец, до сих пор не существовало эмпирических моделей, описывающих весь профиль плотности плазмосферной плазмы в плоскости геомагнитного экватора, начиная с высот $\sim 1200 \text{ км}$ ($L \sim 1.2$). Рассматривались данные за весь длительный период работы спутника и, конечно, полученный средний профиль относится к периодам низкой и умеренной магнитной активности.

По данным о температуре протонов, несмотря на большой разброс значений, в плоскости магнитного экватора определены два профиля (2) и (3), относящиеся к изменению дневной и ночной температуры протонов с расстоянием от Земли, соответственно. Эти профили показывают, что скорость роста температуры протонов практически не зависит от времени суток, но значение температуры днем в среднем выше, чем ночью.

Вариации температуры протонов в плазмосфере указывают на прямую связь с температурой электронов в ионосфере и на влияние освещенности ионосферы. Кулоновская длина свободного пробега электронов $\lambda_e = 1.3 \times 10^5 \ln(\Lambda)^{-1} T_e^2 N_e^{-1} \text{ см}$, где T_e и N_e — температура (K) и плотность элек-

тронов (см^{-3}), кулоновский логарифм $\ln(\Lambda) \approx 15-20$. В плазмосфере, кроме ее внешних областей ($L > \sim 5$), λ_e меньше длины силовой линии и плазме надо рассматривать, как столкновительную. Поэтому температуру ионов в плазмосфере главным образом определяют кулоновские столкновения электронов и ионов.

В работе [Kotova et al., 2008] по данным МАГИОНа-5 сравнивалось отношение температуры протонов в плазмосфере к температуре электронов в верхней ионосфере для двух диапазонов L : $2.5 < L < 2.8$ и $3 < L < 3.1$. Было показано, что температура протонов в экваториальной плоскости внутренней плазмосферы при $L = 2.5-2.8$ не более, чем на 20% превышает температуру электронов в верхней ионосфере на тех же L -оболочках при всех MLT , кроме послеполуночно-вечернего сектора. Однако на $L = 3.0-3.1$ и геомагнитной широте $\lambda \approx 15^\circ$ температура протонов в плазмосфере уже на 60–70% превышает температуру электронов в основании силовых линий в верхней ионосфере. Измерения на МАГИОНе-5 проводились в годы высокой солнечной активности 1999–2001 г. и разница в отношениях температур соответствует, показанной на рис. 5 для 1999–2000 г. по данным ИНТЕРБОЛа-1.

Дополнительно влияние температуры ионосферы на температуру плазмосферы видно из рис. 6, причем влияние на температуру плазмосферы оказывает температура ионосферы в ближайшем основании силовой линии.

6. ВЫВОДЫ

Получена формула для изменения плотности протонов с расстоянием от центра Земли во всей плазмосфере в плоскости геомагнитного экватора. Подтверждено, что плотность протонов в плазмосфере не зависит от местного локального времени.

В плоскости геомагнитного экватора получены количественные оценки возрастания температуры тепловых протонов с удалением от Земли, при этом, ожидаемо, в темное время суток температура протонов в среднем ниже на 15–20%, чем в светлое время. Скорость роста температуры протонов практически не зависит от времени суток.

Отношение температуры ионов в плазмосфере к температуре электронов верхней ионосферы возрастает с величиной L . В годы высокой солнечной активности рост указанного отношения температур происходит быстрее, чем в годы низкой активности.

Температура в плазмосфере определяется освещенностью ионосферы в ближайшем основании силовой линии и не зависит от освещенности противоположного полушария.

Количественные характеристики зависимости параметров протонов от расстояния до Зем-

ли в плоскости магнитного экватора можно использовать для анализа различных физических процессов в околоземной плазме.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны организаторам и создателям за возможность использования базы данных по параметрам солнечного ветра и индексам солнечной активности OMNIWeb Data Explorer (nasa.gov) и баз данных параметров ионосферы (<http://cedar.openmadriral.org/list>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Безруких В.В., Барабанов Н.А. и др. Исследование малоэнергичной плазмы на борту Хвостового и Аврорального зондов: Аппаратура и предварительные результаты // Космич. исслед. Т. 36. С. 33–41. 1998.
- Котова Г.А. Плазмосфера Земли. Современное состояние исследований // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 47. № 4. С. 1–16. 2007.
- Веригин М.И., Котова Г.А., Безруких В.В., Ажентиева О.С. Восстановление распределения плотности протонов в плазмосфере Земли по измерениям вдоль орбиты спутника ИНТЕРБОЛ-1 // Геомагнетизм и аэронавигация Т. 52. № 6. С. 763–768. 2012.
- Котова Г.А., Веригин М.И., Безруких В.В. Использование физического моделирования для выбора адекватного метода определения положения плазмопаузы // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 57. № 4. С. 409–417. 2017. <https://doi.org/10.7868/S0016794017040101>
- Berube D., Moldwin M.B., Fung S.F., Green J.L. A plasmaspheric mass density model and constraints on its heavy ion concentration // J. Geophys. Res. V. 110. A04212. 2005. <https://doi.org/10.1029/2004JA010684>
- Carpenter D.L., Remote sensing the Earth's plasmasphere // Rad. Sci. Bull. 308. P. 13–29. 2004.
- Carpenter D.L., Anderson R.R. An ISEE/whistler model of equatorial electron density in the magnetosphere // J. Geophys. Res. V. 97. P. 1097–1108. 1992. <https://doi.org/10.1029/91JA01548>
- Carpenter D., Lemaire, J. The plasmasphere boundary layer. Ann. Geophys. V. 22. No. 12. P. 4291–4298. 2004. <https://doi.org/10.5194/angeo-22-4291-2004>
- Comfort, R.H. Plasmasphere thermal structure as measured by ISEE-1 and DE-1 // Adv. Space Res. V.6. P. 31–40. 1986. [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(86\)90314-5](https://doi.org/10.1016/0273-1177(86)90314-5)
- Comfort R.H. Thermal structure of the plasmasphere // Adv. Space Res. V. 17. P. (10)175–(10)184. 1996. <https://doi.org/10.1134/S0010952506050042>
- Comfort R.H., Newberry I.T., Chappell C.R. Preliminary statistical survey of plasmaspheric ion properties from observations by DE 1/RIMS // Geophys. monograph series — Modeling Magnetospheric plasma. V. 44. P. 107–114. 1988.
- Craven P.D., Gallagher D.L., Comfort R.H. Relative concentration of He⁺ in the inner magnetosphere as observed by the DE 1 retarding ions mass spectrometer // J. Geophys. Res. V. 102. № A2. P. 2279–2289. 1997. <https://doi.org/10.1029/96JA02176>

- Darrouzet F., Gallagher D.L., André N. et al. Plasmaspheric Density Structures and Dynamics: Properties Observed by the CLUSTER and IMAGE Missions // *Space Sci. Rev.* V. 145. P. 55–106. 2009.
<https://doi.org/10.1007/s11214-008-9438-9>
- Denton R.E., Menietti J.D., Goldstein J., Young S.L., Anderson R.R. Electron density in the magnetosphere // *J. Geophys. Res.* V. 109. A09215. 2004.
<https://doi.org/10.1029/2003JA010245>
- Gurnett D.A., Persoon A.M., Randall R.E et al. The POLAR Plasma Wave Instrument // *Space Sci. Rev.* V. 71. P. 583. 1995.
- 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 // *J. Adv. Space Res.* V. 30. P. 1831–1834. 2002a.
[https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(02\)00458-1](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)00458-1)
- Kotova G.A., Bezrukikh V.V., Verigin M.I., Lezhen L.A., Barabanov N.A. Interball 1 / Alpha 3 cold plasma measurements in the evening plasmasphere: quiet and disturbed magnetic conditions // *J. Adv. Space Res.* V. 30. P. 2313–2318. 2002b.
[https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(02\)80256-3](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)80256-3)
- 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.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2007.08.054>
- Kotova G.A., Verigin M.I., Bezrukikh V.V. The effect of the Earth's optical shadow on thermal plasma measurements in the plasmasphere // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 120. P. 9–14. 2014.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2014.08.013>
- Kotova G.A., Verigin M.I., Bezrukikh V.V. Physics-based reconstruction of the 3-D density distribution in the entire quiet time plasmasphere from measurements along a single pass of an orbiter // *J. Geophys. Res. Space Physics.* V. 120. P. 7512–7521. 2015.
<https://doi.org/10.1002/2015JA021281>
- Kotova G., Verigin M., Lemaire J., Pierrard V., Bezrukikh V., Smilauer J. Experimental study of the plasmasphere boundary layer using MAGION 5 data // *J. Geophys. Res.* V. 123. P. 1251–1259. 2018.
<https://doi.org/10.1002/2017JA024590>
- Park C.G., Carpenter D.L., Wiggins D.B. Electron density in the plasmasphere: whistler data on the solar cycle, annual, and diurnal variations // *J. Geophys. Res.* V. 83. P. 3137–3144. 1978.
<https://doi.org/10.1029/JA083iA07p03137>
- Pierrard V., Goldstein J., André N., Jordanova V.K., Kotova G.A., Lemaire J.F., Liemohn M.W., Matsui H. Recent progress in physics-based models of the plasmasphere // *Space Sci. Rev.* V. 145. P. 193–229. 2009.
<https://doi.org/10.1007/s11214-008-9480-7>
- Reinisch B. W., Haines D.M., Bibl K. et al. The radio plasma imager investigation on the IMAGE spacecraft // *Space Sci. Rev.* V. 91. P. 319. 2000.
<https://doi.org/10.1023/A:1005252602159>
- Reinisch B.W., Moldwin M.B., Denton R.E., Gallagher D.L., Matsui H., Pierrard V., Tu J. Augmented empirical models of plasmaspheric density and electric field using IMAGE and CLUSTER data // *Space Sci. Rev.* V. 145. P. 231–261. 2009.
<https://doi.org/10.1007/s11214-008-9481-6>
- Sheeley B.W., Moldwin M.B., Rassoul H.K., Anderson R.R. An empirical plasmasphere and trough density model: CRRES observations // *J. Geophys. Res.* V. 106(A11). P. 25631–25641. 2001.
<https://doi.org/10.1029/2000JA000286>