

**ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ И ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА  
НА ТЕМПЕРАТУРУ И ПЛОТНОСТЬ ПЛАЗМЫ В ПЛАЗМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ****EFFECT OF SOLAR ACTIVITY AND SOLAR WIND PARAMETERS  
ON PLASMA TEMPERATURE AND DENSITY IN EARTH'S PLASMASPHERE****Г.А. Котова** *Институт космических исследований РАН,  
Москва, Россия, kotova@cosmos.ru***Д.В. Чугунин** *Институт космических исследований РАН,  
Москва, Россия, dimokch@cosmos.ru***В.В. Безруких***Институт космических исследований РАН,  
Москва, Россия, bezrukikh31@mail.ru***G.A. Kotova***Space Research Institute RAS,  
Moscow, Russia, kotova@cosmos.ru***D.V. Chuginin***Space Research Institute RAS,  
Moscow, Russia, dimokch@cosmos.ru***V.V. Bezrukikh***Space Research Institute RAS,  
Moscow, Russia, bezrukikh31@mail.ru*

**Аннотация.** По данным измерений на спутниках «Интербол-1» и «Магион-5» проекта «Интербол» в 1995–2001 гг. проанализирована зависимость характеристик экваториальной плазмосферы от местного магнитного времени, а также от солнечной активности, динамического давления и плотности солнечного ветра. Плотность протонов в годы минимума солнечного цикла в среднем выше, чем в годы максимума, что, вероятно, является следствием понижения доли протонов в массовом составе ионов плазмосферы на фазе максимума. Дневные и ночные температуры протонов возрастают с увеличением потока ультрафиолетового излучения Солнца, по крайней мере, в годы максимума солнечного цикла. Плотность и тепловое давление плазмосферной плазмы увеличиваются с ростом динамического давления и/или плотности невозмущенного солнечного ветра, что, возможно, связано с перестройкой электрического поля конвекции в магнитосфере.

**Ключевые слова:** холодная плазма, плотность, температура, местное магнитное время, солнечная активность, геомагнитная активность, давление солнечного ветра.

**Abstract.** Measurements from the Interball-1 and Magion-5 satellites of the Interball mission in 1995–2001 have been used to analyze the dependence of the equatorial plasmasphere characteristics on magnetic local time, as well as on solar activity, dynamic pressure, and solar wind density. The proton density at solar minimum is on average higher than at solar maximum, which is probably due to changes in plasma mass composition in the plasmasphere at solar maximum. The daytime and nighttime proton temperatures increase with increasing solar extreme ultraviolet flux, at least in the years of solar maximum. The plasmaspheric plasma density and thermal pressure rise with increasing dynamic pressure and/or density of the undisturbed solar wind, which might be associated with restructuring of the convective electric field in the magnetosphere.

**Keywords:** cold plasma, density, temperature, magnetic local time, solar activity, geomagnetic activity, solar wind pressure.

**ВВЕДЕНИЕ**

Большинство исследований, анализирующих влияние солнечного ветра (СВ) на внутреннюю магнитосферу, ограничиваются рассмотрением внешней границы области холодной плазмы — плазмопаузы.

Изменения плотности плазмы в плазмосфере на разных  $L$ -оболочках ( $L$  — параметр Мак-Илвайна, расстояние в плоскости магнитного экватора до силовой линии магнитного поля Земли в радиусах Земли  $R_E$ ) в течение дня, года и солнечного цикла впервые были представлены в работе [Park et al., 1978] на основе данных вистлеров. Плотность плазмы, определенная по частоте и времени распространения вистлеров, относится к экваториальной плоскости плазмосферы. На большом статистическом материале, полученном с наземной станции в Калифорнии ( $\sim 110^\circ$  W)

показаны годовые вариации плотности. Плотность плазмы на магнитной оболочке  $L \approx 2.5$  в декабре была в  $\sim 1.5$  раза больше, чем в июне. С уменьшением солнечной активности от 1957 к 1964 г. плотность плазмы также уменьшается. Кроме того, Park et al. [1978] на основании предыдущих исследований подчеркивали, что динамика плазмы во внутренней плазмосфере при  $L < \sim 3$  отличается от динамики плазмы внешней плазмосферы. Распределение плазмы во внутренней плазмосфере мало подвержено влиянию геомагнитной активности и близко к равновесному уровню насыщения, когда потоки плазмы вниз из плазмосферы ночью компенсируются потоками из ионосферы днем.

В работе [Carpenter, Andersen, 1992] было рассмотрено не только изменение положения плазмопаузы, но и динамика плотности холодной плазмы

в плазмосфере вблизи экваториальной плоскости при  $2 < L < 8$  в различных условиях. По данным волновых экспериментов на спутнике ISEE и наземным данным по исследованию вистлеров была выведена эмпирическая формула расчета максимальной плотности электронов  $N_{eq}$ , регистрируемой при длительных спокойных геомагнитных условиях,

$$\begin{aligned} \lg(N_{eq}(L, d, R)) = & -0.3145L + 3.9043 + \\ & + 0.15 \cos[2\pi(d+9)/365] \times \exp[-(L-2)/1.5] - \\ & - 0.5 \cos[4\pi(d+9)/365] \times \exp[-(L-2)/1.5] + \\ & + (0.00127R - 0.0635) \times \exp[-(L-2)/1.5], \end{aligned} \quad (1)$$

где  $d$  — порядковый номер дня в году;  $R$  — среднее за 13 месяцев число солнечных пятен. В (1) главными являются первые два члена, описывающие падение плотности плазмы с удалением от Земли, но авторы учитывают также возрастание плотности холодной плазмы с ростом солнечной активности, годовые (или сезонные) вариации с максимумом плотности в декабре и полугодовые вариации с максимумами плотности в равноденствие [Carpenter, 1962]. Однако приведенная формула (1) не содержит зависимости от местного магнитного времени (MLT). Для выявления такой зависимости было недостаточно данных, полученных во внутренней плазмосфере в длительных спокойных периоды.

Позднее было установлено, что годовые вариации плотности плазмосферной плазмы не всегда сопровождаются наблюдением декабрьского максимума. Плотность плазмы в плазмосфере в июне может быть больше, чем зимой. Это зависит от географической долготы области наблюдения [Menk et al., 2012; Чугунин и др., 2017; Kim et al., 2018]. В работе [Yasyukevich et al., 2019] проанализировано изменение полного электронного содержания в плазмосфере (PEC) над Иркутском ( $52^{\circ}17' N$ ,  $104^{\circ}18' E$ ) в дневное и ночное время в течение нескольких лет (2010–2013 гг.). Авторы показали, что в этом регионе значения PEC летом больше, чем зимой; повышенные значения PEC наблюдались также в периоды равноденствия. Корреляция с индексами геомагнитной и солнечной активности отмечалась только для дневных значений PEC.

Не была подтверждена также и прямая зависимость плотности плазмосферной плазмы от солнечной активности. Шим с соавторами [Shim et al., 2017] действительно указывают на небольшое возрастание PEC на 10–30 % на высотах 1336–20200 км с ростом солнечной активности, но при этом отмечают падение электронного содержания вблизи экваториальной плоскости с ростом геомагнитной активности в годы максимума солнечного цикла. Richards et al. [2000] анализируют сезонные вариации плотности плазмы в плазмосфере и указывают на антикорреляцию плотности электронов и с геомагнитной, и с солнечной активностью вследствие изменений плотности нейтрального водорода ионосферы.

Вариации параметров внутренней плазмосферы, должны быть тесно связаны с вариациями параметров верхней ионосферы. Вариации плотности и температуры плазмы с периодом 27 дней (синодиче-

ский период вращения солнечных пятен составляет 27.2753 суток) в верхней ионосфере по данным спутников серии DMSP рассмотрены Ричем с соавторами [Rich et al., 2003]. В максимуме солнечного цикла в вечернем временном секторе плотность периодически изменяется на 40–50 %, а температура — на 5–10 %. 27-дневные колебания параметров верхней ионосферы были выявлены на всех широтах ниже полярного овала. Эти широты соответствуют магнитным оболочкам плазмосферы. Наличие таких вариаций параметров верхней ионосферы авторы естественно связывают с изменениями потока ионизирующего ультрафиолетового излучения Солнца. При этом в более низких областях ионосферы в слоях E или F такие вариации параметров плазмы слабо выражены в экваториальной плоскости [Lee et al., 2012]. По мнению авторов [Rich et al., 2003; Lee et al., 2012], на низких высотах распределение ионосферной плазмы подвержено другим сильным динамическим процессам, которые скрывают 27-дневные вариации. Рич с соавторами предположили, что подобные вариации параметров должны существовать в плазмосфере.

О существовании в плазмосфере вариаций плотности плазмы с периодом около 27 дней сообщалось только при анализе данных, полученных при  $L > 4.5$  на спутниках Van Allen Probes [Thaller et al., 2019]. Авторы не обнаружили корреляции плотности плазмы во внешней плазмосфере с потоком крайнего УФ-излучения Солнца (EUV, Extreme Ultra Violet) и связали наблюдаемые вариации с влиянием электрического поля конвекции в магнитосфере, т. е. с процессами опустошения и заполнения плазмосферы. Для внешней плазмосферы такое объяснение кажется вполне обоснованным.

Прямое влияние СВ на плотность плазмы в плазмосфере, по-видимому, впервые рассматривалось Котовой и др. [Kotova et al., 2002a, b]. Данные, полученные на космическом аппарате (КА) «Интербол-1» в июле–октябре 1999 г. в вечернем (15–22 MLT) и утреннем (02–10 MLT) секторах на внешних L-оболочках плазмосферы ( $L \sim 3.5$ ), свидетельствовали о том, что плотность плазмы в плазмосфере возрастает с увеличением динамического давления СВ. Задержка между измерениями СВ и плазмы в плазмосфере составляла не более 6 ч.

Яковски и Хок [Jakowski, Noque, 2018] отмечают, что в эмпирической модели плотности плазмосферы, построенной для области  $L < 3$ , заметно, что плотность холодной плазмы во внутренней плазмосфере на дневной стороне выше, чем на ночной, при заданных одинаковых начальных значениях плотности на высоте 1000 км. Авторы связывают этот факт с поджатием магнитосферы на дневной стороне из-за ее оттекания потоком СВ.

По измерениям параметров СВ — плотности, динамического давления, электрического поля, и индекса геомагнитной активности  $K_p$  — удалось построить численную модель плазмосферы с машинным обучением, позволяющую предсказывать характеристики этой области магнитосферы на 1–2 дня вперед [Bianco et al., 2023]. Это свидетельствует о том, что прямое влияние СВ на внутреннюю область

магнитосферы существенно и требует внимательного анализа.

Почти все исследования в плазмосфере Земли базируются на измерениях плотности плазмы, чаще всего плотности электронов, которую можно получить из различных волновых экспериментов по исследованию низкочастотных излучений в магнитосфере. Прямые измерения параметров плазмосферы осуществляются очень редко, но только в таких экспериментах можно определить температуру и энергию тепловой плазмы.

В настоящей работе по данным измерений КА «Интербол-1» и чешского субспутника «Магион-5» проекта «Интербол» в 1995–2001 гг. мы вначале проанализируем зависимость характеристик экваториальной плазмосферы от расстояния до Земли (величины  $L$ ) и местного магнитного времени, что позволит уменьшить влияние этих факторов на поиск других причин вариаций плотности и температуры плазмосферной плазмы. Затем будет рассмотрено влияние солнечной активности и параметров СВ на плотность и температуру холодных протонов в плазмосфере Земли.

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Настоящая работа основана на данных, полученных с помощью широкоугольного анализатора холодной плазмы с тормозящим потенциалом ПЛ-48 (цилиндр Фарадея), установленного на спутниках проекта «Интербол».

«Интербол-1» был запущен в августе 1995 г. на орбиту с апогеем  $\sim 200\,000$  км, перигеем  $\sim 500$  км, наклоном  $63.8^\circ$  и периодом обращения вокруг Земли  $\sim 90$  ч. Пересечения плазмосферы происходили  $\sim 1$  раз в 4 дня на фазе минимума 23-го солнечного цикла в 1995–1997 гг. и на фазе максимума цикла — в 1999–2000 гг. В начальный период после запуска спутник достигал ближайшей к Земле  $L$ -оболочки  $L_{\min} \sim 1.4$ . Позднее в результате эволюции орбиты ее перигей поднялся и в 1997–1998 гг. на фазе роста солнечного цикла спутник только изредка попадал в плазмосферу и регистрировал холодную плазму, а с 1999 г. и до конца активной работы спутника перигей орбиты понижался. На каждой орбите КА «Интербол-1» минимальные значения  $L$  наблюдались вблизи магнитного экватора, и это позволило проанализировать динамику параметров холодной плазмы в плоскости магнитного экватора в зависимости от  $L$ , исключив зависимость от широты [Котова, Безруких, 2022]. Энергетические спектры ионов (0–25 эВ) измерялись в течение 2 с с различной периодичностью от 30 с до 5 мин в зависимости от телеметрической моды.

«Магион-5», данные которого также использованы для анализа, был запущен в августе 1996 г. вместе с основным КА «Интербол-2» на орбиту с наклоном  $\sim 65^\circ$ , перигеем  $\sim 1.2 R_E$  и апогеем  $\sim 4 R_E$ . Из-за различных технических проблем данные прибора ПЛ-48 были получены только с августа 1999 г. до июля 2001 г., когда закончилось активное функционирование аппарата. Измерения на этом КА проводились с достаточно высоким временным разрешением, энергетический спектр тепловых протонов

измерялся за 0.4 с со скважностью  $\sim 8$  с. Время обращения вокруг Земли КА «Магион-5» составляло  $\sim 6$  ч, т. е. плазмосфера пересекалась четыре раза в сутки. Однако по разным причинам большинство данных было получено в сутки только на одной нисходящей ветви орбиты, изредка имеются данные с двух последовательных орбит спутника, но также только при входе КА в плазмосферу.

Оба КА стабилизировались вращением с двухминутным периодом вокруг оси, направленной на Солнце. При расчете плазменных параметров по измеренным спектрам предполагалось, что в тепловой области частицы распределены по энергиям по максвелловскому закону с учетом частичного экранирования потенциалом спутника, при этом учитывались скорость совместного вращения плазмы с Землей и скорость КА [Kotova et al., 2014].

Для анализа зависимостей параметров плазмосферной плазмы от солнечной активности и характеристик СВ были созданы базы данных, полученных в периоды слабой и умеренной геомагнитной активности вблизи плоскости магнитного экватора Земли. Это исключает влияние на эти данные зависимости от магнитной широты [Artemyev et al., 2014]. Данные КА «Интербол-1» были получены в диапазоне  $1.2 < L < 5$ , КА «Магион-5» —  $2.5 < L < 3.5$ . На рис. 1 показаны радиальные распределения плотности ( $a$ ) и температуры ( $b$ ) протонов в плазмосфере в экваториальной плоскости по данным КА «Интербол-1» [Котова, Безруких, 2022]. Данные разделены по местному времени, при этом для КА «Интербол-1» оказалось, что дневные пересечения происходили с сентября по январь, а ночные — с марта по июль. Видно, что при  $L > 3.5$  зависимости, аппроксимирующие распределение плотности, и поля точек совпадают, однако во внутренней плазмосфере плотность днем выше плотности ночью примерно в 1.5 раза. Общее, независимо от местного времени и сезона, экваториальное распределение плотности  $N$  было аппроксимировано зависимостью

$$N = 6500 L^{-2.7}. \quad (2)$$

В работе [Котова, Безруких, 2022] показано, что (2) удовлетворительно согласуется с другими эмпирическими соотношениями, полученными в меньшем диапазоне расстояний от Земли. С помощью масштабирования  $N \sim L^{-2.7}$  данные двух спутников были приведены к  $L=3$ . Такая процедура уменьшает влияние зависимости плотности плазмосферы от удаленности от Земли. Зависимость от местного времени более подробно будет рассмотрена в следующем параграфе. Аналогично температура протонов  $T$ , измеренная на разных  $L$ -оболочках на КА «Интербол-1» и «Магион-5», приводилась к  $L=3$  с помощью выражения  $T \sim L^{0.4}$ , хотя из рис. 1,  $b$  видно, что распределения  $T$  имеют гораздо больший разброс значений и на 15–20 % различаются днем и ночью.

## 2. ЗАВИСИМОСТЬ ПЛАЗМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМОСФЕРЫ ОТ МЕСТНОГО МАГНИТНОГО ВРЕМЕНИ

На рис. 2 представлена зависимость от местного магнитного времени плотности ( $a$ ) и температуры ( $b$ )

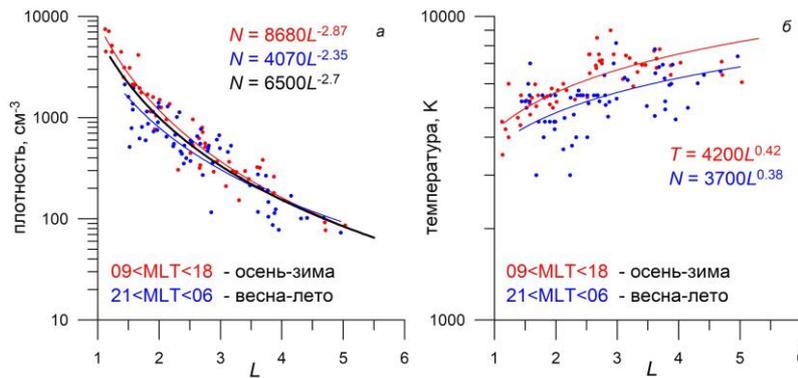


Рис. 1. Зависимости от расстояния до центра Земли плотности (а) и температуры (б) протонов, измеренных на КА «Интербол-1» в плоскости магнитного экватора плазмосферы, для двух интервалов MLT: дневные часы 09.00–18.00 (красные точки) и ночные часы 21.00–06.00 (синие точки). Соответствующие степенные аппроксимации показаны теми же цветами. Черная кривая на панели а соответствует общей аппроксимации (2)

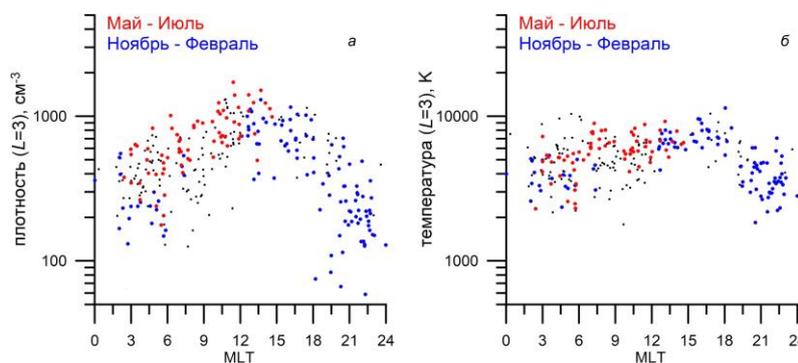


Рис. 2. Зависимости плотности (а) и температуры (б) протонов, измеренных на КА «Магион-5» в плоскости магнитного экватора плазмосферы, от местного магнитного времени. Черные точки — все измерения, красные — измерения, выполненные в мае–июле вблизи летнего солнцестояния, синие — параметры, измеренные зимой вблизи зимнего солнцестояния

протонов, рассчитанных по данным КА «Магион-5». Все измерения на КА «Магион-5» проводились в годы максимума 23-го цикла солнечной активности над областью 50° W – 60° E. Видны значительные изменения параметров плазмосферной плазмы в течение суток.

По этим данным максимальная плотность наблюдается в окрестности полудня. В 12 ч плотность протонов превосходит ночную плотность приблизительно в 2–5 раз (рис. 2, а). Максимум температуры регистрировался около 16 ч (рис. 2, б), что соответствует максимуму в суточном ходе температур ионов и электронов ионосферы на уровне F-слоя и выше [Ляшенко, 2005]. Видно, что суточный ход плотности и температуры ионов не зависит от сезона измерений: видимое изменение параметров, измеренных в мае–июле (красные точки) вблизи летнего солнцестояния, плавно переходит в изменение параметров, измеренных зимой (синие точки) вблизи зимнего солнцестояния. Можно также заметить некоторый подъем температуры в ранние утренние часы, совпадающий с суточными вариациями температуры в ионосфере.

Данные, полученные КА «Интербол-1», относятся к годам как низкой солнечной активности (1995–1997 гг.), так и максимума солнечного цикла (1999–2000 гг.). При представлении всех данных в зависимости от MLT никакого суточного изменения параметров не наблюдается. На рис. 3 показаны изме-

нения плотности и температуры протонов в течение суток, но измеренные только в годы максимума солнечного цикла в интервале 60° W — 60° E. Несмотря на малое количество точек, суточный ход температуры и плотности аналогичен показанному на рис. 2 по данным КА «Магион-5».

### 3. ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАЗМЫ ПЛАЗМОСФЕРЫ

Как уже упоминалось, измерения на КА «Магион-5» проводились в годы максимума 23-го цикла, когда параметры, характеризующие солнечную активность, меняются в широких пределах и это дает возможность посмотреть зависимость плотности и температуры протонов в плазмосфере от солнечной активности. Измерения на КА «Интербол-1» проходили и в годы минимума (1995–1997 гг.), и годы максимума цикла, что позволяет сопоставить плотность и температуру плазмы в плазмосфере в разные периоды.

На рис. 4 показаны зависимости плотности (а, б) и температуры (в) протонов в плазмосфере, измеренные вблизи плоскости магнитного экватора и нормированные на  $L=3$ , от числа солнечных пятен  $R_s$  (а) и потока солнечного радиоизлучения  $F_{10.7}$  (б, в).

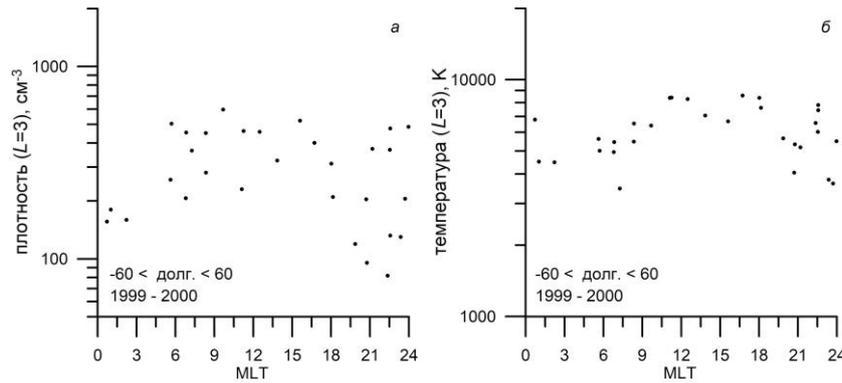


Рис. 3. Зависимости плотности (а) и температуры (б) протонов, измеренных на КА «Интербол-1» в плоскости магнитного экватора плазмосферы, от местного магнитного времени. Представленные измерения сделаны в 1999–2000 гг. в диапазоне географических долгот от  $-60^\circ$  до  $60^\circ$

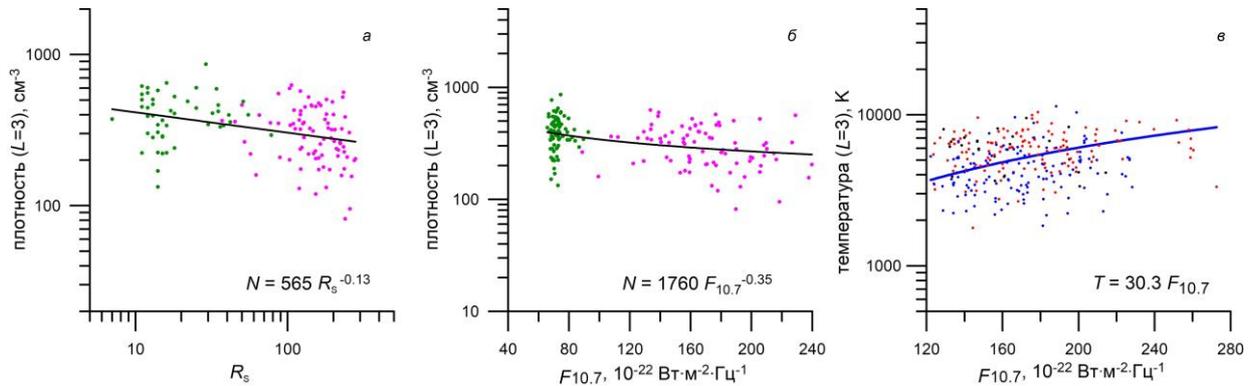


Рис. 4. Зависимости плотности (а, б) и температуры (в) протонов, измеренных на КА «Интербол-1» (а, б) и «Магион-5» (в) в плоскости магнитного экватора плазмосферы, от индексов солнечной активности  $R_s$  (а) и  $F_{10.7}$  (б, в). Зеленым цветом на левых панелях (а, б) отмечены измерения при минимуме солнечной активности (1995–1997 гг.), фиолетовым цветом — измерения в максимуме солнечной активности (1999–2000 гг.). На правой панели (в) красным цветом показаны дневные измерения (06–18 MLT), синим цветом — ночные (18–06 MLT)

Индекс  $F_{10.7}$  неплохо коррелирует с потоком солнечного излучения в EUV-диапазоне. Этот поток является основным фактором ионизации ионосферы от слоя E и выше [Chen et al., 2011]. Хотя  $F_{10.7}$  не всегда корректно описывает поток EUV-излучения, именно он обычно используется для оценок его вариаций.

Данные КА «Интербол-1» (рис. 4, а, б) показывают, что плотность протонов в минимуме цикла (зеленые точки) в среднем выше, чем в максимуме (фиолетовые точки). По данным КА «Магион-5» в максимуме солнечной активности при изменении  $R_s$  от 40 до 350 и  $F_{10.7}$  от 120 до 325 выявить какую-либо зависимость плотности протонов в плазмосфере от этих индексов не удалось. Однако видно возрастание и дневных, и ночных температур протонов с ростом солнечной активности (рис. 4, в).

#### 4. 27-ДНЕВНЫЕ И ГОДОВЫЕ ВАРИАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМОСФЕРЫ

На рис. 5 предпринята попытка обнаружения вариаций температуры и плотности протонов в плазмосфере с периодом около 27 сут. Вертикальные линии отмечают официальные данные начала циклов Кэррингтона (~27.3 сут.) [<https://www.astroleague.org/files/obsclubs/Carrington%20Rotation%20Start%20Dates>.

pdf]. На нижней панели показаны изменения  $F_{10.7}$ . Пик этого индекса в конце марта – начале апреля 2001 г. связан с сильными солнечными вспышками класса X в этот период.

Можно выделить синусоидальные вариации температуры с января по июнь 2001 г с периодом ~28 сут, но заметной корреляции с  $F_{10.7}$  не наблюдается. Это неудивительно, так как корреляция температуры и плотности плазмы в плазмосфере с  $F_{10.7}$  плохо выражена (рис. 4, б, в).

На рис. 6 показаны вариации температуры (красные точки) и плотности (синие), измеренные на КА «Магион-5» и нормированные на  $L=3$  за весь период работы прибора ПЛ-48. По графику изменения температуры протонов видны полугодовые вариации с максимумами в окрестности периодов равноденствия весной (21 марта) и осенью (23 сентября), но выделяется и годовой период изменений температуры и плотности (вертикальные штриховые линии). На графике изменения плотности преобладает максимум в мае–июне 2000 г. Этот максимум, так же как и в феврале–марте 2001, очевидно, является следствием полуденного максимума плотности (см. рис. 2), так как измерения в этот период проходили в дневном секторе плазмосферы. Рисунок 2 показывает, что во внутренней плазмосфере зависимость плотности плазмы от местного времени более существенна, чем

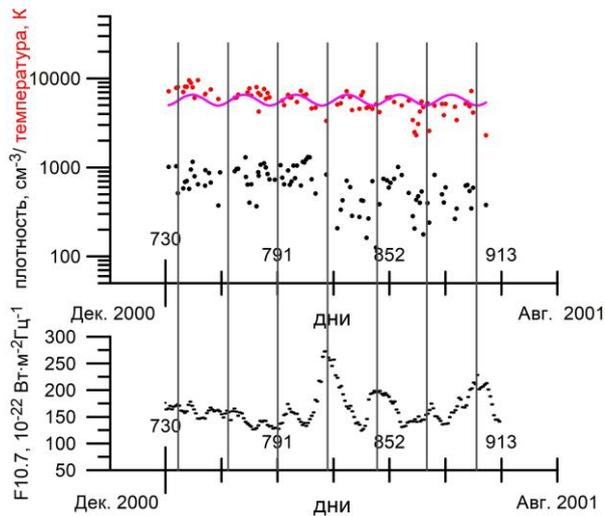


Рис. 5. Изменение с января по июнь 2001 г. температуры (верхняя панель) и плотности (средняя панель) протонов, измеренных на КА «Магион-5» в плоскости магнитного экватора плазмосферы. Ось абсцисс — дни с начала 1999 г. Розовая кривая на верхней панели — аппроксимация данных по температуре синусоидальной зависимостью. Нижняя панель — вариации F10.7 [https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/eval2.cgi]. Вертикальные линии — начала солнечных оборотов Кэррингтона, по наблюдениям на Земле [https://www.astroleague.org/files/obsclubs/Carrington%20Rotation%20Start%20Dates.pdf]

зависимость от сезона измерений, по крайней мере, в секторе долгот, в котором проводились измерения на КА «Магион-5» (50° W – 60° E). Динамика температуры, по-видимому, свидетельствует о том же. Локальный максимум температуры протонов, наблюдаемый вблизи весеннего равноденствия в начале апреля 2000 г. (~460 день) регистрировался около 16–17 ч MLT. Затем температура достигает локального максимума в середине августа 2000 г. около 6 ч MLT. В те же часы максимумы температур видны на рис. 2, б, хотя периоды этих наблюдений близки к весеннему и осеннему равноденствию.

Измерения на КА «Интербол-1» проходили не столь часто, как на КА «Магион-5», и потому объема данных недостаточно для рассмотрения сезонных вариаций параметров плазмосферной плазмы.

### 5. СВЯЗЬ ПЛОТНОСТИ И ТЕПЛОВОГО ДАВЛЕНИЯ ИОНОВ В ПЛАЗМОСФЕРЕ С ПЛОТНОСТЬЮ И ДИНАМИЧЕСКИМ ДАВЛЕНИЕМ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Несмотря на то, что КА «Интербол-1» пересекал плазмосферу Земли только раз в четверо суток и только при достаточно низком перигее орбиты, длительный период работы КА позволяет проанализировать зависимость характеристик холодной плазмосферной плазмы от параметров набегающего на магнитосферу Земли потока СВ.

На рис. 7 показаны зависимости плотности (а, б) и теплового давления протонов (в), измеренных на КА «Интербол-1» в плоскости магнитного экватора плазмосферы, от плотности  $N_{sw}$  (а) и динами-

ческого давления (б, в) СВ  $\rho V_{sw}^2$  ( $\rho$  — массовая плотность,  $V_{sw}$  — скорость СВ). Прямые линии отображают аппроксимирующие зависимости, при этом черным цветом (а, в) показаны зависимости, полученные по всем точкам (соотношения, написанные черным цветом). Коэффициенты детерминации  $D$  указаны также для аппроксимаций по всем измерениям. На панели б для примера соответствующими цветами показаны аппроксимации отдельно для измерений, выполненных в годы минимума и максимума. Видно, что зависимости близки. При этом еще раз продемонстрировано, что плотность тепловых протонов в плазмосфере в годы низкой солнечной активности в среднем выше, чем в годы высокой.

Зависимости, показанные на панелях а, б, взаимосвязаны, поскольку динамическое давление СВ главным образом определяется его плотностью (рис. 8). Красная линия и соответствующее соотношение на панели а получены из уравнений  $N = 142.3\rho V_{sw}^2$  и  $\rho V_{sw}^2 = 0.28N_{sw}$ . Рассчитанная зависимость практически совпадает с полученной аппроксимацией. Таким образом, невозможно сказать, какая зависимость основная.

Зависимость на панели в, возможно, является следствием зависимости плотности протонов в плазмосфере от динамического давления СВ (б).

Данные КА «Магион-5» указывают на наличие тех же связей между характеристиками плазмосферной плазмы и параметрами СВ, но только для дневной области плазмосферы (рис. 9).

### 6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Мы постарались по данным спутников проекта «Интербол» максимально подробно проанализировать различные факторы, влияющие на изменения плотности и температуры холодной плазмы в экваториальной плоскости внутренней части плазмосферы Земли. Основным фактором, определяющим распределение плотности и температуры холодной плазмосферной плазмы около Земли, является расстояние магнитных плазменных оболочек от Земли. Для исключения влияния удаленности от Земли места измерения плазмы данные масштабировались на магнитную оболочку  $L=3$ . Анализировались данные, полученные только внутри плазмосферы, но не в области ее пограничного слоя или в плазмосферных плюмажах.

Вторым фактором, который может существенно влиять на распределение плазмы в плазмосфере, является местное время. Измерения, выполненные на КА «Магион-5» в годы высокой солнечной активности, свидетельствуют о сильной зависимости плотности протонов от местного времени измерений. Максимум плотности наблюдается около 12 ч MLT, плотность в ночные часы в среднем в 2–5 раз ниже.

Изменения температуры протонов во внутренней плазмосфере в зависимости от MLT аналогичны суточным вариациям температуры ионосферы, что подтверждает и анализ, выполненный ранее [Kotova et al., 2002a, 2008]. По данным КА «Магион-5» было пока-

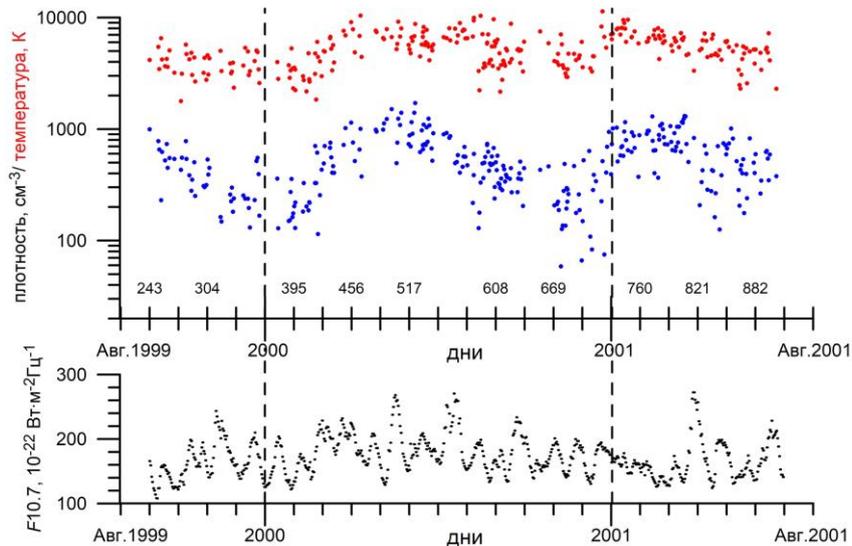


Рис. 6. Вариации температуры (красные точки) и плотности (синие) протонов, измеренных на КА «Магион-5» в плоскости магнитного экватора плазмосферы, с сентября 1999 г. по июнь 2001 г. Ось абсцисс — дни с начала 1999 г. Нижняя панель — вариации F10.7 [<https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/eval2.cgi>]. Вертикальные линии — смена года

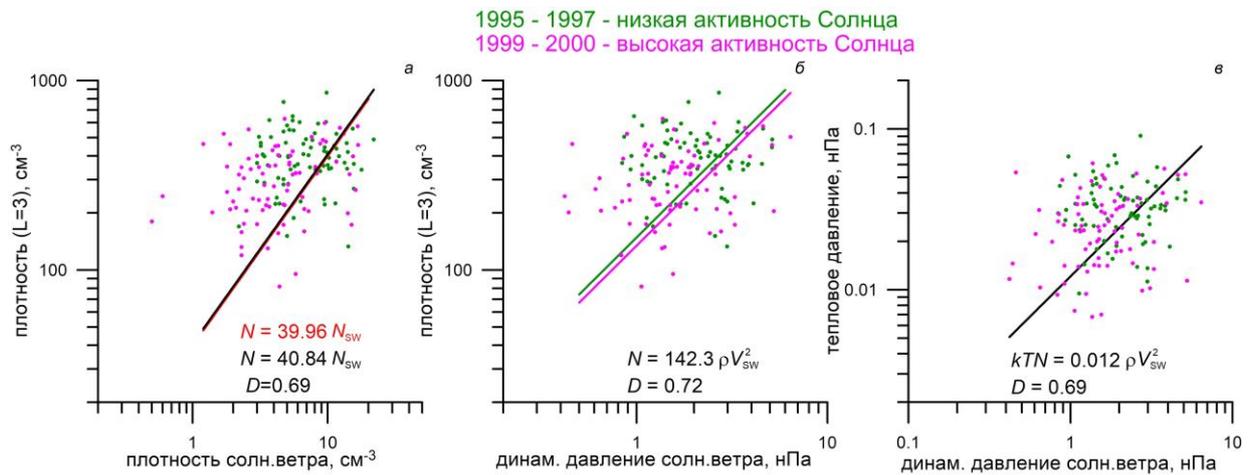


Рис. 7. Зависимости плотности (а, б) и теплового давления (е) протонов, измеренных на КА «Интербол-1» в плоскости магнитного экватора плазмосферы, от плотности  $N_{sw}$  (а) и динамического давления (б, е) СВ. Зеленый цвет — измерения в минимуме солнечной активности (1995–1997 гг.), фиолетовый — в максимуме (1999–2000 гг.). Прямые линии — аппроксимирующие зависимости

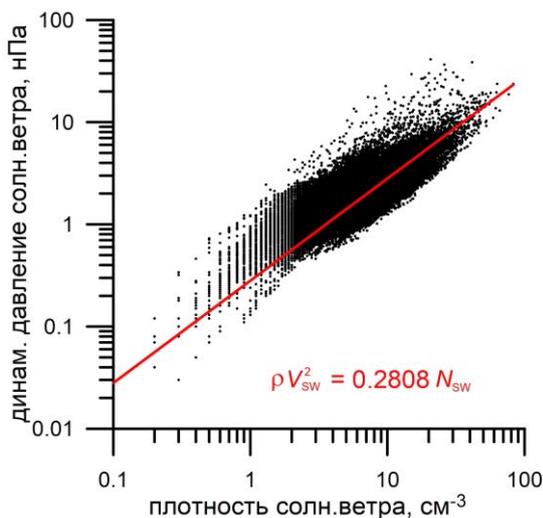


Рис. 8. Зависимость динамического давления СВ от плотности протонов 01.08.1995–30.09.2000

зано, что температура ионов в плазмосфере при  $L < \sim 2.5-2.8$  близка к температуре электронов в верхней ионосфере при всех значениях MLT, кроме полуденно-вечерней области (12–20 MLT), где температура в плазмосфере выше, чем в ионосфере [Kotova et al., 2008]. Отношение температуры ионов в плазмосфере к температуре электронов верхней ионосферы возрастает с  $L$ . В годы высокой солнечной активности рост указанного отношения температур происходит быстрее, чем в годы низкой [Котова, Безруких, 2022].

Данные КА «Интербол-1», относящиеся к периоду высокой солнечной активности, подтверждают суточные вариации плотности и температуры протонов, выявленные по измерениям КА «Магион-5». Однако возможно, что из-за заметной разницы между магнитной и географической осями Земли повышение плотности ионов в дневные часы и суточные вариации температуры также зависят

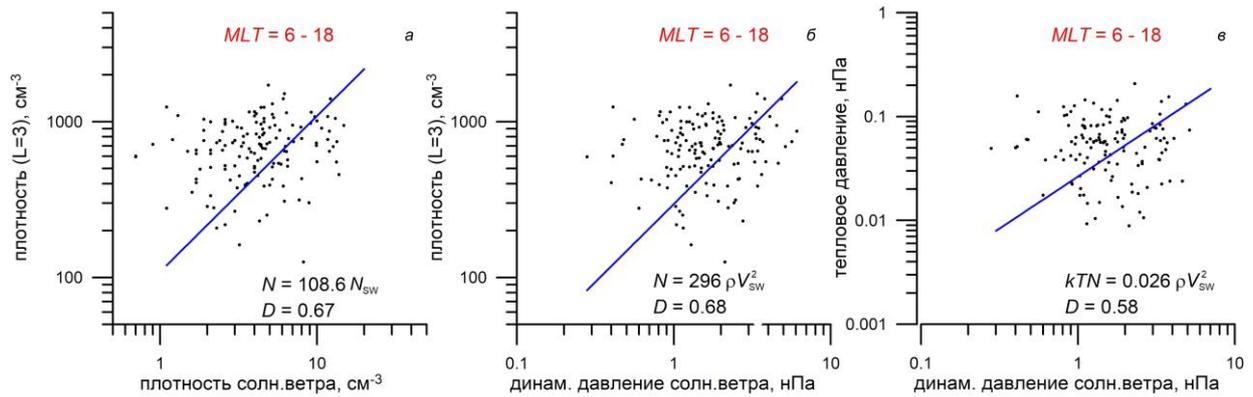


Рис. 9. Зависимости плотности (а, б) и теплового давления (е) протонов, измеренных на КА «Магион-5» в плоскости магнитного экватора дневной плазмосферы, от плотности  $N_{sw}$  (а) и динамического давления  $\rho V_{sw}^2$  (б, е) солнечного ветра. Прямые линии — аппроксимирующие зависимости

от географической долготы места, над которым производятся измерения. Для проверки этого имеющихся данных недостаточно.

Помимо рассмотренных двух очевидных факторов, определяющих плотность и температуру плазмосферной плазмы, солнечная, геомагнитная активность и поток СВ, набегающий на Землю и формирующий распределение плазмы и магнитного поля в магнитосфере, оказывают существенное влияние на характеристики холодной плазмы.

По данным КА «Интербол-1», полученным в годы минимума и максимума 23-го цикла, плотность протонов внутренней плазмосферы в годы низкой солнечной активности была в среднем больше, чем в годы высокой. Измерения на КА «Интербол-1» в периоды минимума и максимума солнечного цикла равномерно распределены по местному времени. Разброс значений плотности при этом достаточно большой (см. рис. 4). Полученный результат не совпадает с полученным ранее [Park et al., 1978] по наземным данным измерений вистлеров в 1957–1964 гг. Результаты же, полученные по данным полного электронного содержания в плазмосфере [Shim et al., 2017], зависят, прежде всего, от определения *PEC* которое может включать или не включать область верхней ионосферы с преобладанием ионов кислорода. Высота перехода от кислорода к водороду также зависит от многих факторов.

Более вероятной причиной расхождения данных, полученных на КА «Интербол-1» в минимуме и максимуме солнечной активности, и волновых измерений плотности электронов является различие массового состава плазмосферной плазмы в эти периоды. По измерениям на КА «Интербол-1» мы определяем только плотность протонов, рассчитывая ее на основе аппроксимации максвелловским распределением главного пика в энергетическом спектре ионов [Kotova et al., 2014]. Между тем, по различным данным было показано, что с ростом солнечной активности и величины *F10.7* в плазмосфере увеличивается относительное содержание ионов гелия и кислорода [Craven et al., 1997; Denton et al., 2025]. В силу квазинейтральности плазмы плотность электронов равна сумме плотностей всех положительных ионов, по-

этому при значительном увеличении количества более тяжелых ионов плотность протонов может и уменьшаться.

Никакого тренда в изменении температуры протонов при сравнении измерений в минимуме и максимуме солнечного цикла по данным КА «Интербол-1» не выявлено. Более подробные данные КА «Магион-5», полученные в период максимума цикла, не указывают на какую-либо зависимость плотности ионов от солнечной активности, но свидетельствуют об увеличении и дневных, и ночных температур протонов с ростом индексов солнечной активности.

При анализе вариаций плотности и температуры протонов, измеренных на КА «Магион-5» в плоскости магнитного экватора плазмосферы, в годы максимума цикла (сентябрь 1999 г. – июнь 2001 г.) определить сезонные вариации не удастся, поскольку явно более существенными оказываются суточные вариации, которые скрывают, по-видимому, менее значимые сезонные изменения параметров.

Иногда можно выделить 27-дневные вариации температуры в плазмосфере, но для подробного анализа таких вариаций и их связи с потоком солнечного УФ-излучения нужно больше данных.

Рассмотренные данные в основном относятся к периодам слабой и умеренной геомагнитной активности. Никак не выделяются из остальных плазмосферных данных измерения, выполненные на главной фазе магнитных бурь: 22.10.1999 и 13.01.1996 на КА «Интербол-1», 15.10.1999, 26.06.2000, 29.08.2000, 20.03.2001, 28.03.2001 — на КА «Магион-5» (один пролет через плазмосферу 13.08.2000 во время восстановления после значительной бури (минимальный *Dst* = -234 нТл, 12.08), а также измерения на этом спутнике во время SSC 26.11.2000). Никакой зависимости плотности или температуры протонов внутренней плазмосферы от индексов геомагнитной активности  $K_p$ , *Dst*, *AE* не выявлено. Однако это относится к средним характеристикам плазмосферы. Для того чтобы посмотреть изменения характеристик плазмы в одном событии, например в течение одной магнитной бури, надо измерять плотность и температуру плазмы в одной области в течение длительного времени. Один раз за 6 ч такие измере-

ния удалось провести на КА «Интербол-2» [Веригин и др., 2011]. Было 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. Такое поведение температуры ионов удалось объяснить с помощью модели перемещения дрейфовой оболочки от Земли, вызванного уменьшением магнитного поля во внутренней плазмосфере при развитии магнитной бури.

И, наконец, обратимся к зависимости характеристик плазмосферы от параметров СВ. Данные КА «Интербол-1» свидетельствуют о возрастании плотности плазмосферной плазмы с увеличением внешнего напорного (динамического) давления СВ. На такую же зависимость в дневной области плазмосферы указывают данные КА «Магион-5». Давление СВ играет основную роль во взаимодействии геомагнитного поля и потока СВ. Это взаимодействие определяет форму магнитосферы, ее поджатие с дневной стороны и вытянутый в антисолнечном направлении магнитный хвост. Однако внутри магнитосферы давление холодной магнитосферной плазмы чрезвычайно мало по сравнению с давлением магнитного поля и не может непосредственно зависеть от давления СВ. Однако формирование плазмосферы и плазмопаузы существенно определяется электрическим полем конвекции в магнитосфере. Величина и распределение в магнитосфере этого поля конвекции, вероятно, зависят от давления СВ [Лукьянова, 2004]. По-видимому, именно таким опосредованным образом давление и плотность СВ влияют на плотность холодных протонов. Этот вопрос требует серьезного теоретического анализа.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным КА «Интербол-1» и «Магион-5», полученным в плазмосфере Земли вблизи экваториальной плоскости, проанализированы возможные причины вариаций плотности и температуры тепловых (холодных) протонов. Получены следующие результаты.

Основными факторами, определяющими изменения плотности и температуры холодной плазмы в экваториальной плоскости плазмосферы, являются удаленность магнитной оболочки от Земли и местное время. В среднем изменения температуры протонов во внутренней плазмосфере в зависимости от MLT аналогичны суточным вариациям температуры ионосферы — максимальные температуры наблюдаются после рассвета и после полудня. По данным спутника «Магион-5» в годы высокой солнечной активности максимум плотности протонов наблюдался в ~12 ч MLT.

Дополнительно плотность и температура плазмы во внутренней плазмосфере зависят от фазы 11-летнего солнечного цикла. Плотность протонов в годы минимума в среднем выше, чем в годы максимума, что, вероятно, является следствием изменения массового состава плазмы в плазмосфере и понижения доли протонов в плотности ионов в фазе максимума.

Дневные и ночные температуры протонов возрастают с увеличением потока УФ-излучения Солнца, по крайней мере, в годы максимума.

Плотность и тепловое давление плазмосферной плазмы увеличиваются с ростом динамического давления и/или плотности невозмущенного СВ, что, видимо, связано с перестройкой электрического поля конвекции в магнитосфере.

Для более полного исследования причин вариаций характеристик тепловой плазмосферной плазмы, с одной стороны, необходимо проанализировать данные волновых наземных и спутниковых измерений, которые позволяют определять плотность фоновой плазмы, чтобы определить суточный ход плотности в различных долготных секторах в течение всего солнечного цикла. Дополнительный анализ поведения температуры плазмосферной плазмы при отсутствии новых локальных плазменных измерений, по-видимому, следует провести по данным предыдущих экспериментов, выполненных, например, на спутниках Dynamics Explorer-1, 2 (DE-1 и DE-2). С другой стороны, для понимания причин изменения характеристик плазмосферы необходимо теоретическое рассмотрение физических взаимосвязей процессов в магнитосфере и межпланетной среде.

Авторы благодарны создателям сайта за возможность использования базы данных по параметрам солнечного ветра и индексам солнечной активности [<https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/eval1.cgi>].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Веригин М.И., Котова Г.А., Безруких В.В. и др. Дрейф ионов во внутренней плазмосфере Земли во время магнитосферных возмущений и динамика температуры протонов. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2011, т. 51, № 1, с. 41–50.
- Котова Г.А., Безруких В.В. Распределения плотности и температуры тепловых протонов в плоскости магнитного экватора плазмосферы Земли по данным космического аппарата «Интербол-1». *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2022, т. 62, № 5, с. 590–598. DOI: [10.31857/S0016794022050066](https://doi.org/10.31857/S0016794022050066).
- Лукьянова Р.Ю. Влияние резких изменений динамического давления солнечного ветра на конвекцию в полярной шапке. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2004, т. 44, № 6, с. 750–761.
- Ляшенко М.В. Вариации параметров ионосферной плазмы в период спада 23 цикла солнечной активности. *Труды VIII Конференции молодых ученых. Секция «Физика околоземного космического пространства», БШФФ-2005*. 2005, с. 108–112. URL: <http://bsfp.iszf.irk.ru/sites/default/files/school/2005/Lyashenko-108-112.pdf> (дата обращения 30 мая 2025 г.).
- Чугунин Д.В., Котова Г.А., Клименко М.В., Клименко В.В. Долготная зависимость распределения концентрации  $H^+$  в плазмосфере по данным спутника «Интербол-1». *Космические исследования*. 2017, т. 55(6), с. 471–478. DOI: [10.7868/S0023420617060097](https://doi.org/10.7868/S0023420617060097).
- Artemyev A.V., Kotova G.A., Verigin M.I. Role of the field-aligned density distribution for efficiency of electron scattering by hiss waves. “Physics of Auroral Phenomena”. *Proc. XXXVII Annual Seminar. Apatity*. 2014, pp. 55–58.
- Bianco S., Haas B., Shprits Y. PINE-RT: An operational real-time plasmasphere model. *Front. Astron. Space Sci.* 2023, vol. 10, 1116396. DOI: [10.3389/fspas.2023.1116396](https://doi.org/10.3389/fspas.2023.1116396).
- Carpenter D.L. Electron-density variations in the magnetosphere deduced from whistler data. *J. Geophys. Res.* 1962, vol. 67, no. 9, pp. 3345–3360. DOI: [10.1029/JZ067i009p03345](https://doi.org/10.1029/JZ067i009p03345).

- Carpenter D.L., Anderson R.R. An ISEE/whistler model of equatorial electron density in the magnetosphere. *J. Geophys. Res.* 1992, vol. 97, pp. 1097–1108. DOI: [10.1029/91JA01548](https://doi.org/10.1029/91JA01548).
- Chen Y., Liu L., Wan W. Does the F10.7 index correctly describe solar EUV flux during the deep solar minimum of 2007–2009? *J. Geophys. Res.* 2011, vol. 116, A04304. DOI: [10.1029/2010JA016301](https://doi.org/10.1029/2010JA016301).
- Craven P.D., Gallagher D.L., Comfort R.H. Relative concentration of He<sup>+</sup> in the inner magnetosphere as observed by the DE 1 retarding ion mass spectrometer. *J. Geophys. Res.* 1997, vol. 102, no. A2, pp. 2279–2289. DOI: [10.1029/96JA02176](https://doi.org/10.1029/96JA02176).
- Denton R.E., Takahashi K., Hartley D.P. Models for plasmasphere and plasmatrough density and average ion mass including dependence on L, MLT, geomagnetic activity, and phase of the solar cycle. *Front. Astron. Space Sci.* 2025, vol. 11, 1459281. DOI: [10.3389/fspas.2024.1459281](https://doi.org/10.3389/fspas.2024.1459281).
- Jakowski N., Hoque M.M. A new electron density model of the plasmasphere for operational applications and services. *J. Space Weather Space Clim.* 2018, vol. 8, no. A16. DOI: [10.1051/swsc/2018002](https://doi.org/10.1051/swsc/2018002).
- Kim E., Kim Y.H., Jee G., Sessanga N. Reconstruction of plasmaspheric density distributions by applying a tomography technique to Jason-1 plasmaspheric TEC measurements. *Radio Sci.* 2018, vol. 53, pp. 866–873. DOI: [10.1029/2017RS006527](https://doi.org/10.1029/2017RS006527).
- 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.* 2008, vol. 70, no. 2–4, pp. 399–406. DOI: [10.1016/j.jastp.2007.08.054](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2007.08.054).
- Kotova G., Bezrukikh V., Verigin M. The effect of the Earth's optical shadow on thermal plasma measurements in the plasmasphere. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2014, vol. 120, pp. 9–14. DOI: [10.1016/j.jastp.2014.08.013](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2014.08.013).
- 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.* 2020a, vol. 30, no. 7, pp. 1831–1834. DOI: [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., et al. Interball 1/Alpha 3 cold plasma measurements in the evening plasmasphere: quiet and disturbed magnetic conditions. *J. Adv. Space Res.* 2002b, vol. 30, iss. 10, pp. 2313–2318. DOI: [10.1016/S0273-1177\(02\)80256-3](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)80256-3).
- Lee C.-K., Han S.-C., Bilitza D., Seo K.-W. Global characteristics of the correlation and time lag between solar and ionospheric parameters in the 27-day period. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2012, vol. 77, pp. 219–224. DOI: [10.1016/j.jastp.2012.01.010](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2012.01.010).
- Menk F.W., Ables S.T., Grew R.S., et al. The annual and longitudinal variations in plasmaspheric ion density. *J. Geophys. Res.* 2012, vol. 117, A03215. DOI: [10.1029/2011JA017071](https://doi.org/10.1029/2011JA017071).
- Park C.G., Carpenter D.L., Wiggins D.B. Electron density in the plasmasphere: Whistler data on solar cycle, annual, and diurnal variations. *J. Geophys. Res.* 1978, vol. 83, no. A7, pp. 3137–3144. DOI: [10.1029/JA083iA07p03137](https://doi.org/10.1029/JA083iA07p03137).
- Rich F.J., Sultan P.J., Burke W.J. The 27-day variations of plasma densities and temperatures in the topside ionosphere. *J. Geophys. Res.* 2003, vol. 108, no. A7, 1297. DOI: [10.1029/2002JA009731](https://doi.org/10.1029/2002JA009731).
- Richards P.G., Chang T., Comfort R.H. On the causes of the annual variation in the plasmaspheric electron density. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2000, vol. 62, pp. 935–946.
- Shim J.S., Jee G., Scherliess L. Climatology of plasmaspheric total electron content obtained from Jason 1 satellite. *J. Geophys. Res.* 2017, vol. 122, pp. 1611–1623. DOI: [10.1002/2016JA023444](https://doi.org/10.1002/2016JA023444).
- Thaller S.A., Wygant J.R., Cattell C.A., et al. Solar rotation period driven modulations of plasmaspheric density and convective electric field in the inner magnetosphere. *J. Geophys. Res.* 2019, vol. 124, pp. 1726–1737. DOI: [10.1029/2018JA026365](https://doi.org/10.1029/2018JA026365).
- Yasyukevich A.S., Vesnin A.M., Yasyukevich Yu.V., Padokhin F.M. Correlation between total and plasmasphere electron content and indexes of solar and geomagnetic activity. *Russian Open Conference on Radio Wave Propagation (RWP)*. Kazan, Russia. 2019, pp. 87–90. DOI: [10.1109/RWP.2019.8810364](https://doi.org/10.1109/RWP.2019.8810364).  
URL: <https://www.astroleague.org/files/obsclubs/Carrington%20Rotation%20Start%20Dates.pdf> (дата обращения 30 мая 2025 г.).  
URL: <https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/eval2.cgi> (дата обращения 30 мая 2025 г.).

Статья подготовлена по материалам Двадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», 10–14 февраля 2025 г., Институт космических исследований РАН, Москва, Russia.

Как цитировать эту статью:

Котова Г.А., Чугунин Д.В., Безруких В.В. Влияние солнечной активности и параметров солнечного ветра на температуру и плотность плазмы в плазмосфере Земли. *Солнечно-земная физика*. 2025, т. 11, № 3, с. 26–35. DOI: [10.12737/szf-113202503](https://doi.org/10.12737/szf-113202503).