

УДК 551.510.537

РЕГУЛЯРНЫЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ПЛОТНОСТИ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ ПЛАЗМОСФЕРЫ

© 2023 г. Г. А. Котова¹, *, В. В. Безруких¹, Д. В. Чугунин¹,
М. М. Могилевский¹, А. А. Чернышов¹

¹Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), Москва, Россия

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

Поступила в редакцию 21.02.2023 г.

После доработки 23.04.2023 г.

Принята к публикации 03.08.2023 г.

По измерениям тепловой плазмы на спутниках МАГИОН-5 и ИНТЕРБОЛ-1 в пограничном слое плазмосферы выделены повторяющиеся подобные изменения плотности протонов в зависимости от L -оболочки. Такие вариации плотности имеют следующие характерные особенности: (а) изменения плотности происходят резко и на профиле плотности – зависимости плотности от L или от геомагнитной широты λ – имеют пилообразный характер, плотность протонов в пиках (максимумах) вариаций превышает плотность в минимумах вариаций в 2–8 раз, (б) характерный размер вариаций в радиальном направлении в плоскости геомагнитного экватора $\sim 0.15 R_E$ или ~ 1000 км; (в) пилообразные изменения плотности протонов в пограничном слое плазмосферы могут охватывать не менее 90° по долготе; (г) регулярные вариации плотности плазмы наблюдались на геомагнитных широтах до 30° , причем эта широта ограничена орбитами спутников, данные которых использовались для анализа. Пилообразные вариации плотности тепловой плазмы, по-видимому, относятся к пространственным структурам, эволюционирующим, но сохраняющимся в пограничном слое плазмосферы, по крайней мере, в течение суток. Неоднородности плазмы наблюдались при достаточно спокойной или немного возмущенной геомагнитной обстановке. Рассмотренные неоднородности, вероятно, являются следствием перестановочной или квазиперестановочной неустойчивости, развивающейся в пограничном слое плазмосферы.

DOI: 10.31857/S0016794023700013, EDN: EGFOPP

1. ВВЕДЕНИЕ

Область магнитосферы Земли выше ионосферы, в которой доминирующую роль играет холодная тепловая плазма с энергией менее 1–2 эВ, делится на область собственно плазмосферы и пограничный слой плазмосферы. Область достаточно плотной тепловой плазмы с концентрацией больше $10\text{--}100\text{ см}^{-3}$ имеет или очень резкую, или достаточно плавную границу [Lemaire, Gringauz, 1998; Котова, 2007]. Следуя определению Карпентера и Андерсона [Carpenter, Anderson, 1992] будем определять границу плазмосферы – плазмопаузу, как внутреннюю границу области, где плотность (N) плазмы падает в 5 или более раз при изменении L на 0.5 (L – параметр Мак Иллвайна, расстояние до центра Земли в радиусах Земли в экваториальной плоскости). Пограничным слоем плазмосферы называется область толщиной от 0.1 L до 1.5 L , заполненная холодной плазмой и примыкающая к плазмопаузе с ее внешней стороны [Kotova et al., 2018]. Плотность плазмы в этой области спадает экспоненциально с увеличением L [Carpenter, Lemaire, 2004; Kotova et al., 2018].

Распределение плазмы в плазмосфере и в пограничном слое плазмосферы часто, хотя и не всегда, сопровождается значительными неоднородностями плотности. Различные структуры и неоднородности плазмосферы анализировались в ряде работ по данным отдельных пролетов спутников [Horwitz et al., 1990] и по данным одновременных измерений на нескольких космических аппаратах [Darrouzet et al., 2004, 2009], а также по томографическим измерениям [Helmboldt et al., 2020; Helmboldt, 2020] и с помощью “фотографирования” плазмосферы в ультрафиолетовом диапазоне [Sandel et al., 2003; Darrouzet et al., 2009].

Крупномасштабные структуры в плазмосфере были классифицированы по данным космического аппарата IMAGE [Sandel et al., 2003]. Выделены 4 основных типа структур в распределении плотности в плазмосфере: каверны плотности и каналы, “плечо” на экваториальной проекции плазмопаузы и плазмосферные хвосты или плюмажи. Авторы продемонстрировали, что плазмосферные плюмажи (хвосты) это вытянутые области плазмосферы, примыкающие к основной ее части, а не оторвавшиеся “куски” плазмосферы с

повышенной концентрацией тепловой плазмы по сравнению с окружающим пространством, как предполагали ранее по единичным пролетам спутников через плазмосферу [напр., Higel, Wu, 1984]. Каналы – вытянутые вдоль широты узкие области пониженного содержания плазмы. Каналы, возможно, образуются, вслед за плюмажами, когда последние начинают закручиваться вокруг плазмосферы [Sandel et al., 2003]. “Плечо” – асимметричный выступ на плазмопаузе с резкой границей с восточной стороны (изменение радиуса плазмопаузы $\Delta R \sim 0.5R_E$, где R_E – радиус Земли). Каверны плотности (“bite-out”, “notch”) – узкие, ограниченные по долготе, опустошенные области (силовые трубки) плазмосферы. Каверны – занимают $< \sim 10\text{--}30$ градусов по долготе и простираются от $L \sim 2\text{--}3$ до границы плазмосферы в соседних более плотных областях [Sandel et al., 2003; Kotova et al., 2004; Котова и др., 2008].

Все перечисленные структуры являются обособленными единичными образованиями, и при прямых измерениях плотности плазмы на спутнике выглядят, как однократное падение и/или возрастание плотности плазмы. Кроме таких структур на профилях измеренной плотности плазмы в зависимости от параметра L наблюдаются частые многократные вариации, вызванные, вероятно, временными изменениями внешних факторов определяющих динамику плазмосферы, в первую очередь это геомагнитная активность, а также состояние нижежающей ионосферы, взаимодействия с энергичными частицами кольцевого тока и магнитосферного хвоста, волновые взаимодействия. Сравнительно мелкомасштабные вариации плотности были проанализированы по данным четырех спутников проекта CLUSTER [Dargouzet et al., 2004]. Наблюдения на нескольких спутниках позволили определить характерный масштаб рассматриваемых неоднородностей в экваториальной плоскости – 365 км и максимальный масштаб – ~ 5000 км при среднем изменении плотности $\sim 20\%$. Была также определена скорость перемещения неоднородностей и показано, что они в среднем коротируют с Землей. Отмечалось, что наиболее крупномасштабные неоднородности наблюдаются в спокойных геомагнитных условиях при индексе $Kp < 2$. Неоднородности чаще наблюдались в слое около плазмопаузы (в современной терминологии в пограничном слое плазмосферы), чем в глубине плазмосферы, но это, возможно, связано с тем, что перигей спутников CLUSTER был на расстоянии $\sim 4R_E$ от центра Земли.

По данным спутников RBSP (Van Allen Probes) был выполнен статистический анализ наблюдений кратковременных провалов плотности (уменьшение плотности более, чем на 25%) в плазмосфере и пограничном слое плазмосферы [Ferradas et al.,

2021]. Применялась автоматическая методика поиска провалов плотности. По данным RBSP небольшие провалы плотности в плазмосфере наблюдаются очень часто. [Ferradas et al., 2021] свидетельствуют о том, что внутри плазмосферы провалы плотности чаще наблюдаются на ночной стороне в 21:06 MLT в отличие от результатов, полученных по данным спутников CLUSTER, где неоднородности чаще наблюдались во всех других секторах местного времени. Также по данным RBSP провалы плотности чаще (56%) наблюдались внутри плазмопаузы, чем в пограничном слое плазмосферы. Возможно, этот результат связан с выбранным критерием определения плазмосферы. Считалось, что космический аппарат находится внутри плазмосферы, если измеренная плотность плазмы выше 30 см^{-3} и выше $N_0 = 10(6.6/L)^4 \text{ см}^{-3}$.

В работах [Helmboldt, 2020; Helmboldt et al., 2020] разработана методика создания картин неоднородностей в плазмосфере с помощью томографии по данным Интерферометрического радиотелескопа VLA (*Very Large Array*) и данных спутников GPS. Авторы рассматривали коротирующие неоднородности плазмы. Возможными причинами возникновения таких неоднородностей они считают развитие суббурь и/или развитие перестановочной неустойчивости на магнитных оболочках $L = 3\text{--}4$.

Однако среди вариаций плотности в плазмосфере можно выделить повторяющиеся подобные изменения, которые и будут рассмотрены ниже. При этом в настоящей статье будут рассмотрены только неоднородности пограничного слоя плазмосферы.

Целью настоящей работы является анализ данных, полученных на космических аппаратах МАГИОН-5 и ИНТЕРБОЛ-1 проекта “ИНТЕРБОЛ” по вариациям плотности тепловых протонов вдоль орбит спутников внутри пограничного слоя плазмосферы, выявление повторяющихся регулярных вариаций, имеющих устойчивую структуру, определение их протяженности и времени, поиск и определение физических механизмов образования неоднородностей тепловой плазмы в пограничном слое плазмосферы.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Чешский субспутник МАГИОН-5, данные которого использованы для анализа, был запущен в августе 1996 г. вместе с основным космическим аппаратом ИНТЕРБОЛ-2 на орбиту с наклоном $\sim 65^\circ$, перигеем $\sim 1.2R_E$ и апогеем $\sim 4R_E$. К сожалению, после одного дня работы связь с субспутником была потеряна, но ее удалось восстановить через примерно 20 месяцев после запуска. После восстановления связи все системы космического

аппарата работали в штатном режиме. Однако штанга, на которой для измерения тепловых ионов был установлен широкоугольный анализатор с тормозящим потенциалом ПЛ-48, раскрылась не сразу, поэтому данные были получены в период с августа 1999 г. до июля 2001 года, когда закончилось активное функционирование аппарата. Измерения на этом спутнике проводились с достаточно высоким временным разрешением, энергетический спектр тепловых протонов измерялся за 0,4 с со скважностью ~ 8 с, что и позволяет исследовать структуру пограничного слоя плазмосферы [Котова и др., 2008]. Время обращения вокруг Земли космического аппарата МАГИОН-5 составляло около 6 часов, то есть плазмосфера пересекалась 4 раза в сутки. Однако по разным причинам большинство данных было получено только на одной нисходящей части орбиты в сутки, изредка имеются данные с двух последовательных орбит спутника, но также только при входе аппарата в плазмосферу.

Для анализа неоднородностей пограничного слоя плазмосферы будут привлечены также данные спутника ИНТЕРБОЛ-1, несмотря на то, что временное разрешение измерений на этом спутнике гораздо хуже. На этом спутнике был установлен комплекс аппаратуры Альфа-3, также включавший широкоугольный анализатор с тормозящим потенциалом ПЛ-48. Энергетические спектры измерялись в течение 2 с с различной периодичностью от 30 с до 5 мин в зависимости от телеметрической моды. Начальные параметры орбиты спутника ИНТЕРБОЛ-1: апогей ~ 200000 км, перигей ~ 500 км, наклонение 63.8° и период обращения вокруг Земли ~ 90 ч. Когда перигей космического аппарата был достаточно низким, орбита проходила через плазмосферу раз в четверо суток.

Оба космических аппарата стабилизировались вращением с 2-х минутным 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, учитывались скорость соращения плазмы с Землей и скорость космического аппарата. Методика обработки данных подробно описана в работе [Kotova et al., 2014].

3. ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ ПЛАЗМОСФЕРЫ И ЕГО СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ

Характеристики пограничного слоя плазмосферы подробно рассмотрены в работе [Kotova et al., 2018]. В упомянутой работе анализировались 110 случаев наблюдения спокойного, неструктурированного пограничного слоя на спут-

нике МАГИОН-5 с помощью широкоугольного энергоанализатора ионов ПЛ-48. На рис. 1 приведены примеры наблюдения такого слоя. Вертикальными пунктирными линиями отмечены положения плазмопаузы (PP), наклонными отрезками прямых показаны аппроксимации профилей плотности и температуры протонов в пограничном слое плазмосферы соответствующими экспоненциальными зависимостями: $N(L) = N_{pp} e^{(L_{pp}-L)/W_N}$ и $T(L) = T_{pp} e^{(L_{pp}-L)/W_T}$, где N – плотность, T – температура протонов, N_{pp} и T_{pp} – параметры на плазмопаузе при $L = L_{pp}$, W_N и W_T – характерные толщины области изменения плотности (пограничный слой плазмосферы) и области изменения температуры, соответственно. Во всех приведенных случаях профили плотности достаточно гладкие без заметных крупномасштабных структур. Изменение параметров геомагнитной активности в период измерений, представленных на рис. 1, показано на рис. 2. Как и следовало ожидать, при повышении магнитной активности плазмопауза приближается к Земле (панели *в*, *г*).

В работе [Kotova et al., 2018] не рассматривались вариации температуры протонов в пограничном слое. На рис. 1 видно, что температура изменяется в 2–4 раза на меньшем характерном масштабе, чем плотность, и затем медленно возрастает. Обычно, температура начинает возрастать на более внешних L -оболочках по сравнению с началом падения плотности. На всем протяжении пограничного слоя описать изменения температуры экспоненциальной зависимостью невозможно. Область высоких температур протонов (несколько десятков, а, иногда, и сотни тысяч градусов) за плазмопаузой, где плотность протонов еще достаточно высока (около 100 см^{-3} или немного меньше) ранее была названа горячей зоной плазмосферы [Bezrukhikh, Gringauz, 1976]. Здесь, вероятно, одновременно существуют две популяции плазмы: горячая и холодная, о чем свидетельствовали измерения на спутнике DE-1 [Comfort, 1996]. При обработке данных спутника МАГИОН-5 предполагалось, что частицы распределены по Максвелловскому закону, поэтому разделить эти 2 популяции нельзя.

Распределения плотности плазмы в пограничном слое плазмосферы не всегда носят такой плавный характер, как в случаях, показанных на рис. 1. На рис. 3 представлен пример изменения плотности в плазмосфере при четырех пролетах спутника МАГИОН-5 22–25 ноября 2000 г. Местное магнитное время вблизи плазмопаузы на всех 4-х пролетах ~ 20.5 MLT Вертикальными пунктирными линиями отмечены положения плазмопаузы. Провал плотности в 2–3 раза на $L \sim 2.6$ – 2.8 (рис. 3*б*, *в*), возможно, связан с пересечением канала плотности, и ниже рассматриваться не бу-

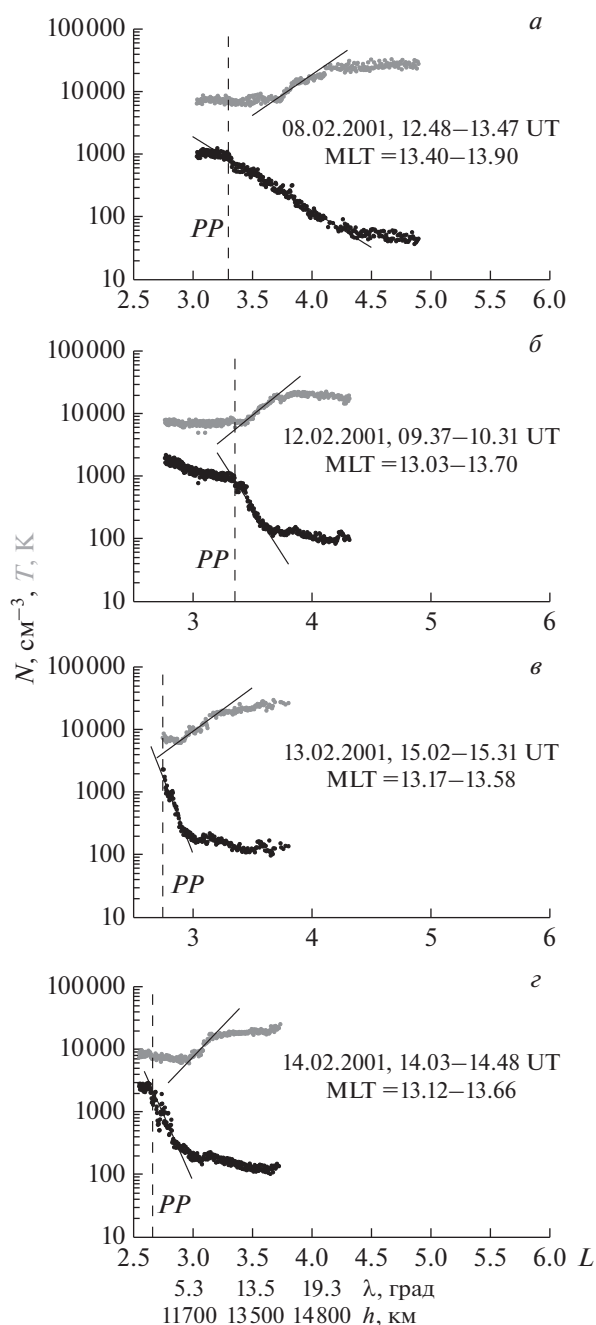


Рис. 1. Примеры изменения плотности (черные точки) и температуры (серые точки) протонов в зависимости от параметра L при пересечении спутником МАГИОН-5 пограничного слоя плазмосферы. На нижней панели (г) указаны также геомагнитная широта λ и высота h спутника вдоль орбиты.

дет. На рис. 3а плазмопауза достаточно резкая, и в пограничном слое никаких структур не видно. Небольшое повышение плотности на $15\text{--}20\%$ при $L > 4.3$, возможно, соответствует пересечению плазмосферного плюмажа. Следует отметить, что за сутки плоскость орбиты спутника практически

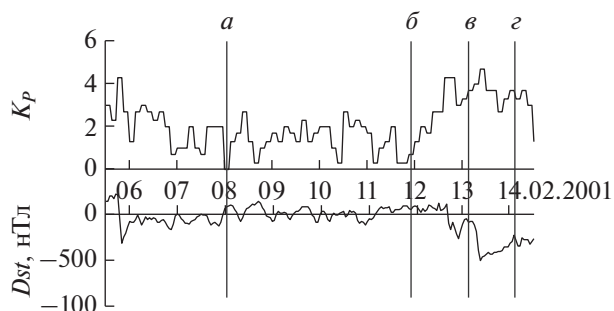


Рис. 2. Вариации индексов геомагнитной активности, K_p и Dst , в период измерений тепловой плазмы на спутнике МАГИОН-5 (рис. 1). Времена пролета пограничного слоя плазмосферы показаны вертикальными линиями, соответствующими панелям на рис. 1.

не изменяется, а Земля и плазмосфера, которая примерно коротирует с Землей, поворачиваются под орбитой спутника на 360° и, соответственно, через сутки измерения происходят в той же области околоземного пространства. 23 ноября 2000 г. (рис. 3б) при пересечении практически той же области плазмосферы в пограничном слое уже видны регулярные повторяющиеся пилообразные изменения плотности, имеющие устойчивую структуру. Плазмопауза сместилась от Земли (вертикальная пунктирная линия). Плотность от максимума к минимуму вариаций меняется приблизительно в 2 раза. Наблюдения происходят на геомагнитной широте $21^\circ\text{--}25^\circ$. Спутник летит ~ 3 мин от одного до другого максимума плотности и смещается на $\Delta L \sim 0.15$. Еще через сутки 24 ноября 2000 г. (рис. 3в) вариации плотности уже значительно менее глубокие $\sim 50\%$, и они наблюдаются на более глубоких L -оболочках (График панели в смещен на $L = 0.52$, относительно остальных панелей). То есть за сутки плазмопауза приблизилась обратно к Земле на $\sim 0.5L$, и вариации плотности стали затухать, хотя их период практически не изменился. Из рис. 3г видно, что через двое суток после начала наблюдения неоднородностей профиль плотности вернулся к первоначально наблюдавшемуся (рис. 3а).

Изменение индексов геомагнитной активности в этот период видно на рис. 4. Время пролетов пограничного слоя плазмосферы на этом рисунке отмечено соответствующими вертикальными линиями. Все измерения происходят в достаточно магнито-спокойный период. По данным K_p -индексов и Dst -вариаций существенных возмущений магнитной активности не было с 13-го ноября. Только в период измерений 24 ноября 2000, показанных на панели в, в магнитосфере наблюдалось слабое возмущение.

Пилообразные вариации плотности тепловой плазмы, по-видимому, относятся к пространственным структурам, эволюционирующим, но сохра-

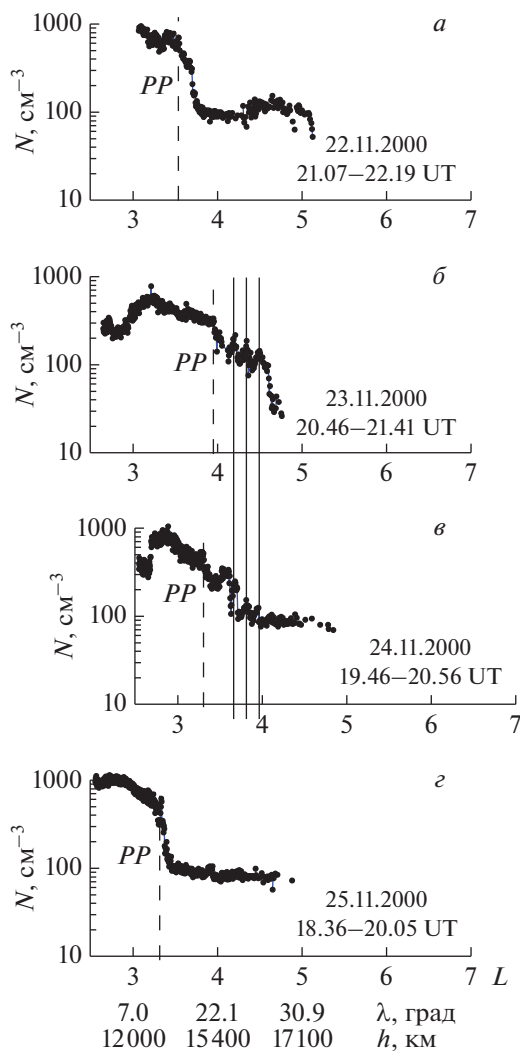


Рис. 3. Изменения плотности протонов в зависимости от параметра L при входе спутника МАГИОН-5 в плазмосферу в предполуденном секторе раз в сутки 22–25 ноября 2000 г. Сплошными вертикальными линиями отмечены максимумы плотности плазмы в наблюдаемых неоднородностях ее распределения. На нижней панели (г) указаны также геомагнитная широта λ и высота h спутника вдоль орбиты.

нящимся в пограничном слое плазмосферы, по крайней мере, в течение суток. Если предположить, что распределение плазмы не меняется за время пролета спутника (скорость спутника 3.5–4 км/с), то характерный размер наблюдаемых неоднородностей плазмы вдоль орбиты спутника 600–700 км.

На рис. 5 показаны данные МАГИОНА-5 за тот редкий период времени, когда были получены параметры плазмы на двух последовательных пролетах спутника через плазмосферу. Местное магнитное время измерений вблизи плазмопаузы на всех 4-х пролетах 15.0–15.3 MLT.

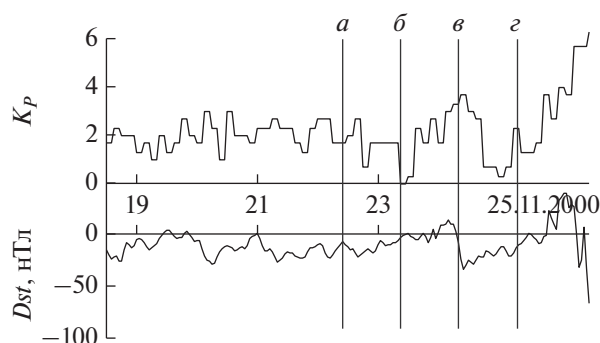


Рис. 4. Вариации индексов геомагнитной активности, K_p и Dst , в период измерений тепловой плазмы на спутнике МАГИОН-5, представленных на рис. 3. Времена пролета пограничного слоя плазмосферы показаны вертикальными линиями, соответствующими панелям на рис. 3.

На рис. 5а видно, что плотность постепенно спадает с увеличением L -оболочки, вариации плотности в пограничном слое нерегулярные и, вероятно, частично связаны с трудностью определения низких значений плотности. Через сутки в той же области плазмосферы (рис. 5б) плазмопауза уже регистрируется гораздо ближе к Земле и после ее пересечения наблюдаются пилообразные изменения плотности. Геомагнитная широта наблюдений – 21°–26°. Еще более значительные вариации плотности наблюдались в пограничном слое спустя 6 часов (рис. 5в). Здесь плотность меняется в 3–8 раз от максимума к минимуму вариаций. Следует обратить внимание, что график панели б смещен на $L = 0.52$, относительно остальных панелей. Период, по крайней мере, первых двух вариаций плотности сохраняется. Этот период такой же, как и в предыдущем случае (рис. 2) ~3 минут, за которые спутник смещается на $\Delta L \sim 0.15$. В тех же предположениях, что и раньше, при скорости спутника 3.6 км/с характерный размер наблюдаемых неоднородностей плазмы вдоль орбиты космического аппарата 650 км. Геомагнитная широта наблюдений неоднородностей на этом пролете 18°–22° близка к широте предыдущего пролета пограничного слоя плазмосферы. На следующем пролете спутника наблюдается резкая плазмопауза без вариаций плотности (рис. 5г). Поскольку профили плотности, полученные 21 января 2001 г. и показанные на рисунках рис. 5б и 5в, относятся к разным областям плазмосферы, повернувшейся за время между этими двумя пролетами на ~90°, эти данные свидетельствуют о том, что в плазмосферном пограничном слое могут существовать достаточно долгоживущие неоднородности плазмы, охватывающие не менее 90° по долготе. При этом положение плазмопаузы может изменяться в пределах

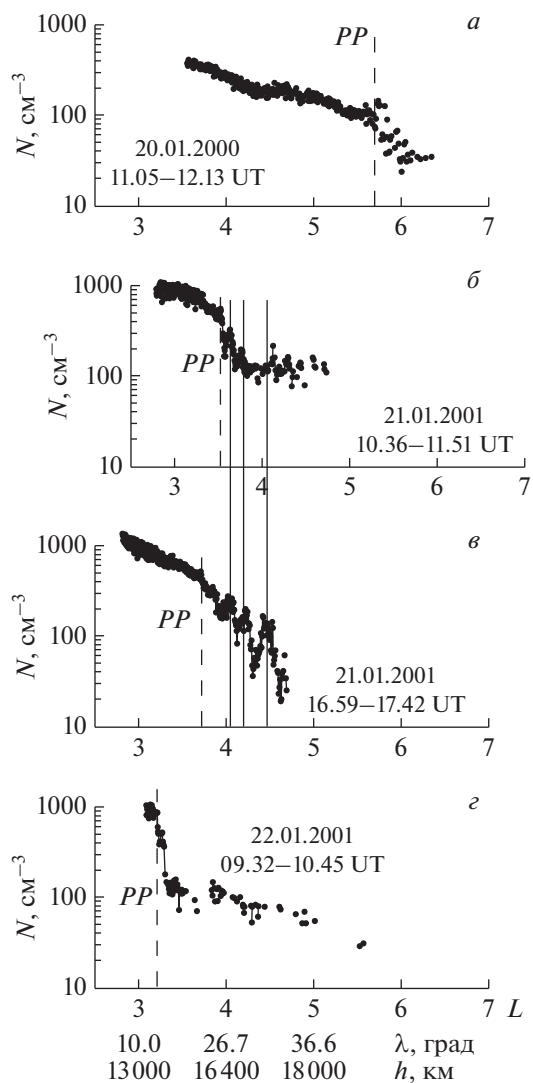


Рис. 5. Изменения плотности протонов в зависимости от параметра L при входе спутника МАГИОН-5 в плазмосферу в послеполуденном секторе 20–22 января 2001 г. Вертикальными сплошными линиями отмечены максимумы плотности плазмы в наблюдаемых неоднородностях ее распределения. На нижней панели (г) указаны также геомагнитная широта λ и высота h спутника вдоль орбиты.

$0.5L$. Такие изменения положения характерны для границы плазмосферы [Horwitz et al., 1990].

На рис. 6 показаны индексы геомагнитной активности, K_p и Dst , в период измерений тепловой плазмы на спутнике МАГИОН-5 18–23 января 2001 года. Вертикальными линиями на этом рисунке отмечены времена на 15 часов раньше пролетов спутника через пограничный слой плазмосферы. 20–21 января 2001 г. Спутник пересекал плазмосферу примерно в 15 часов местного магнитного времени и, следовательно, на 15 часов раньше исследуемая область плазмосферы пересекала полуночный меридиан. В соответствии с

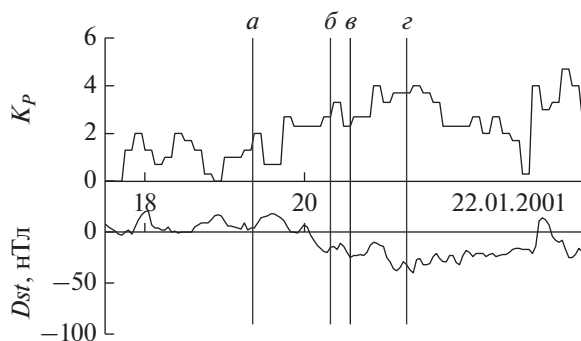


Рис. 6. Вариации индексов геомагнитной активности, K_p и Dst , в период измерений тепловой плазмы на спутнике МАГИОН-5, представленных на рис. 5. Вертикальными линиями показаны времена на 15 часов раньше времен пролетов спутником через пограничный слой плазмосферы.

принятыми представлениями небольшие магнитные возмущения в первую очередь воздействуют на околополуночную область плазмосферы. Сильные магнитные бури оказывают непосредственное влияние на всю плазмосферу [напр., Verbanac et al., 2015].

Пролет через пограничный слой плазмосферы 21 января 2001 г. (рис. 5б) соответствует периоду большей магнитной активности, чем предыдущий пролет (рис. 5а). Более поздний пролет в тот же день (рис. 5в) относился к тем же условиям геомагнитной активности, что и предыдущий. Область вблизи плазмопаузы на последнем из показанных витков пересекала полуночный меридиан уже при повышенной геомагнитной активности, во время развития наибольшей магнитной бури. Таким образом, наблюдаемые изменения положения плазмопаузы можно объяснить изменениями магнитной обстановки в околоземном пространстве.

Пример наблюдения на спутнике ИНТЕРБОЛ-1 регулярных вариаций плотности в пограничном слое плазмосферы 1 октября 1996 г. показан на рис. 7. Измерения проходили в период низкой геомагнитной активности (рис. 8). Скважность измерений на рис. 7 – ~1 мин. Это время, проходящее между измерениями. На рис. 7 на верхней панели показана зависимость плотности протонов от параметра L , а на нижней панели – зависимость той же плотности от геомагнитной широты λ . Левые ветви графиков соответствуют входу ИНТЕРБОЛа-1 в плазмосферу, правые – выходу спутника из плазмосферы. Ближайшая к Земле магнитная оболочка, которой достигает космический аппарат $L = 3.54$. Ее пересечение происходит на геомагнитной широте $\lambda \sim -8.5^\circ$. Двухминутные вариации плотности во внутренней плазмосфере, хорошо видные на зависимости плотности от геомагнитной широты (нижняя па-

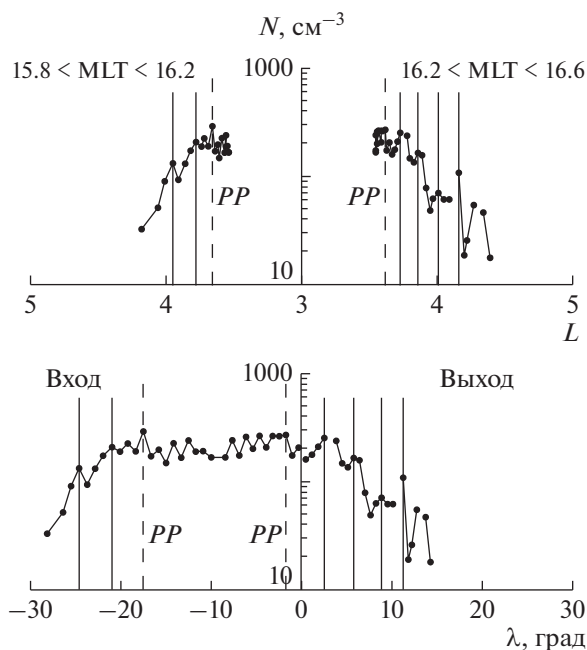


Рис. 7. Изменения плотности протонов в зависимости от L (верхняя панель) и от геомагнитной широты (нижняя панель) при входе в плазмосферу (левые ветви графиков) и при выходе из нее (правые ветви графиков) спутника ИНТЕРБОЛ-1 в послеполуденном секторе 1 октября 1996 г с 6.20 UT до 7.17 UT. Отмечены положения плазмопаузы (пунктирные линии) и положения максимумов плотности (сплошные линии) при ее вариациях в пограничном слое.

нель), вероятно, связаны с вращением аппарата вокруг оси, отклонившейся от направления на Солнце.

Регулярные значительные вариации плотности протонов более отчетливо видны при выходе космического аппарата из плазмосферы. Плотность протонов меняется в 2–5 раз от максимума к минимуму вариаций. Видимый период этих вариаций при пролете на ИНТЕРБОЛе-1 ~ 4–5 минут. Максимумы плотности в вариациях отмечены сплошными вертикальными линиями. Смещение космического аппарата по $L = \sim 0.15$, то же, которое наблюдалось на МАГИОНЕ-5. Измерения на ИНТЕРБОЛе-1 производились примерно на 10° ближе к плоскости геомагнитного экватора, чем измерения на МАГИОНЕ-5. Видимое смещение по широте $\sim 3^\circ$. В предположении, что распределение плазмы не меняется за время пролета спутника, характерный размер наблюдаемых неоднородностей плазмы вдоль орбиты спутника 1200–1500 км. Если считать, что спутник пересекает пространственные структуры плотности, то различие в зависимостях плотности протонов от L и λ при входе спутника в плазмосферу и при выходе из нее связано с различием геомагнитных широт областей пересечения. Спутник входит в

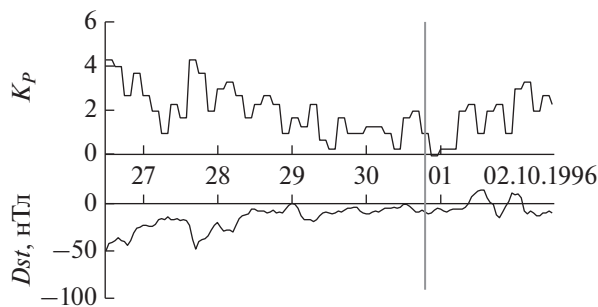


Рис. 8. Изменения индексов геомагнитной активности, K_p и Dst , 27 сентября–2 октября 1996 г. Жирная серая вертикальная линия показывает время пролета спутника ИНТЕРБОЛ-1 через пограничный слой плазмосферы (рис. 6).

плазмосферу на широте $< -20^\circ$, где магнитное поле больше и магнитные оболочки находятся ближе друг к другу, чем вблизи геомагнитного экватора. Скорость спутника также примерно на 10% выше при входе (5.6 км/с), чем при выходе из плазмосферы (5 км/с).

4. ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Анализ приведенных примеров повторяющихся регулярных вариаций плотности протонов в пограничном слое плазмосферы позволяет суммировать характерные особенности этих неоднородностей плазмы.

- Изменения плотности происходят достаточно резко и на профиле плотности – зависимости плотности от L или от λ – имеют пилообразный характер. Плотность протонов меняется в 2–8 раз от максимума к минимуму вариаций.

- Характерный размер вариаций в радиальном направлении в плоскости геомагнитного экватора $\sim 0.15 R_E$ или ~ 1000 км.

- Пилообразные изменения плотности протонов в пограничном слое плазмосферы могут охватывать не менее 90° по долготе.

- Регулярные вариации плотности плазмы наблюдались на геомагнитных широтах до 30° . Эта широта, возможно, ограничена орбитами спутников, данные которых использовались для анализа.

- Пилообразные вариации плотности тепловой плазмы, по-видимому, относятся к пространственным структурам, эволюционирующим, но сохраняющимся в пограничном слое плазмосферы, по крайней мере, в течение суток.

- Неоднородности плазмы наблюдались при достаточно спокойной или немного возмущенной геомагнитной обстановке. Во время магнитных бурь плазмопауза приближается к Земле, и,

по-видимому, формируется достаточно гладкий профиль плотности в узком пограничном слое, или неоднородности носят нерегулярный характер. Возможно, для наблюдения неоднородностей в таком слое временное разрешение измерений должно быть лучше 8 с.

Регулярные пилообразные вариации положения плазмопаузы недавно наблюдались вблизи основания плазмосферных плюмажей (хвостов) на спутниках RBSP, ERG и DMSP [He et al., 2020]. Для наблюдения таких структур спутник должен некоторое время лететь вдоль плазмопаузы. Орбиты спутников ИНТЕРБОЛ-1 и МАГИОН-5, напротив, пересекали плазмопаузу под значительным углом, близким к 90° . Рассмотренные измерения проходили в достаточно магнитоспокойные периоды, существенной геомагнитной активности не наблюдалось и в предшествующие 4–10 дней, тогда как плазмосферные плюмажи образуются после существенных магнитных бурь. И, наконец, авторы [He et al., 2020] говорят о наблюдениях волновой структуры плазмопаузы небольшой протяженности по долготе ($<90^\circ$).

Ввиду того, что рассмотренные в предыдущем параграфе неоднородности наблюдаются в пограничном слое плазмосферы вблизи плазмопаузы при значительном градиенте плотности, можно предположить, что они являются следствием перестановочной или квазиперестановочной неустойчивости. По определению Ж. Лемэра [Lemaire, 1999] чисто перестановочной неустойчивостью называется неустойчивость, возникающая в плазмосфере, когда заполненные плазмой трубки смещаются дальше от Земли, чем незаполненные. При этом смещается вся магнитная трубка целиком и кривизна магнитных линий не учитывается. Впервые такую неустойчивость в применении к магнитосфере Земли рассмотрел Т. Голд в 1959 году [Gold, 1959]. Если “меняются местами” не магнитные трубки целиком, а только их сегменты, то возникает квазиперестановочная неустойчивость. Такую неустойчивость впервые исследовал Newcomb [1961].

В работе [Andre, Lemaire, 2006] подробно рассмотрены условия неустойчивости различных мод перестановочной неустойчивости. Если принимать во внимание гравитационную силу, центробежную силу из-за вращения плазмосферы с Землей и кривизну магнитных силовых линий, то вблизи плазмопаузы при $L > 2$ хотя бы одна из мод перестановочной неустойчивости “поперечная” или “продольная” может развиваться. При этом указывается, что “продольная” мода не подразумевает строго параллельных движений, и движение плазмы обязательно приобретает и медленную составляющую поперек магнитного поля.

В работе [Kotova et al., 2018] было получено, что по данным МАГИОНА-5 характерная толщи-

на пограничного слоя плазмосферы W_N меняется от $0.02L$ до $0.4L$. Соответственно, производная $d \ln N / dL$ лежит в интервале от -50 до $-2.5 1/R_E$. Расчеты Н. Андрэ и Ж. Лемэра [Andre, Lemaire, 2006] областей на плоскости $(L, d \ln N / dL)$, где нарушаются условия стабильности различных распределений плотности плазмы в плазмосфере (рис. 4 и 5 в [Andre, Lemaire, 2006]), показывают, что можно ожидать развития перестановочной неустойчивости в пограничном слое плазмосферы.

Кроме приведенных примеров регулярных вариаций плотности в пограничном слое плазмосферы по всем полученным данным МАГИОНА-5 удалось найти только еще один случай наблюдения аналогичных структур – 21 июня 2000 г. (MLT ≈ 9.5 ч) также при спокойных геомагнитных условиях. При этом достаточно часто в пограничном слое плазмосферы регистрировались различные нерегулярные вариации плотности. Для анализа физических условий формирования и других статистических особенностей рассматриваемых неоднородностей имеющихся экспериментальных данных недостаточно и, видимо, следует привлекать данные современных волновых экспериментов, например, на спутнике ERG (ARASE) и других.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Котова Г.А. Плазмосфера Земли. Современное состояние исследований // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 47. № 4. С. 1–16. 2007. (Kotova G.A. The Earth's plasmasphere: State of studies (a review) // Geomag. Aeron. V. 47. № 4. P. 409–422. 2007. – для англоязычного варианта статьи) <https://doi.org/10.1134/S0016793207040019>
- 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. исследов. Т. 46. № 1. С. 17–26. 2008. (Kotova G.A., Bezrukikh V.V., Verigin M.I., Akentieva O.S., Smilauer J. Study of notches in the Earth's plasmasphere based on data of the MAGION-5 satellite // Cosmic Research. V. 46. № 1. P. 15–24. 2008. – для англоязычного варианта статьи) <https://doi.org/10.1007/s10604-008-1003-5>
- Andre N., Lemaire J.F. Convective instabilities in the plasmasphere // J. Atm. Solar-Terr. Phys. V. 68. P. 213–227. 2006. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2005.10.013>
- Bezrukikh V.V., Gringauz K.I. The hot zone in the outer plasmasphere of the Earth // Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics. V. 38. P. 1085–1091. 1976. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(76\)90038-6](https://doi.org/10.1016/0021-9169(76)90038-6)
- 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 // Annales Geophysicae. V. 22. № 12. P. 4291–4298. 2004. <https://doi.org/10.5194/angeo-22-4291-2004>

- *Comfort R.H.* Thermal structure of the plasmasphere // *Adv. Space Res.* V. 17. № 10. P. 175–184. 1996.
[https://doi.org/10.1016/0273-1177\(95\)00710-V](https://doi.org/10.1016/0273-1177(95)00710-V)
- *Darrouzet F., Decreau P.M.E., De Keyser J., Masson A., Gallagher D.L., Santolik O., Sandel B.R., Trotignon J.G., Rauch J.L., Guirriec E.Le, Canu P., Sedgemore F., Andre M., Lemaire J.F.* Density structures inside the plasmasphere: Cluster observations // *Annales Geophysicae.* V. 22. № 7. P. 2577–2585. 2004.
<https://doi.org/10.5194/angeo-22-2577-2004>
- *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>
- *Ferradas C.P., Boardsen S.A., Fok M.-C., Buzulukova N., Reeves G.D., Larsen B.A.* Observations of density cavities and associated warm ion flux enhancements in the inner magnetosphere // *J. Geophys. Res.* V. 126. № 3. 2020.
<https://doi.org/10.1029/2020JA028326>
- *Gold T.* Motions in the magnetosphere of the Earth // *J. Geophys. Res.* V.64. № 9. P. 1219–1224. 1959.
<https://doi.org/10.1029/JZ064i009p01219>
- *He F., Guo R.-L., Dunn W.R. et al.* Plasmopause surface wave oscillates the magnetosphere and diffuse aurora // *Nature Communications.* V. 11. 1668. 2020.
<https://doi.org/10.1038/s41467-020-15506-3>
- *Helmboldt J.F., Haiducek J.D., Clarke T.E.* The properties and origins of corotating plasmaspheric irregularities as revealed through a new tomographic technique // *J. Geophys. Res.* V. 125. № 3. 2020.
<https://doi.org/10.1029/2019JA027483>
- *Helmboldt J.F.* The properties and origins of corotating plasmaspheric irregularities: Part II—Tomography with compact arrays of GPS receivers // *J. Geophys. Res.* V. 125. № 6. 2020.
<https://doi.org/10.1029/2020JA027858>
- *Higel B., Wu L.* Electron density and plasmopause characteristics at 6.6 RE: a statistical study of the GEOS 2 relaxation sounder data // *J. Geophys. Res.* V. 89. P. 1583–1601. 1984.
<https://doi.org/10.1029/JA089iA03p01583>
- *Horwitz J.L., Comfort R.H., Chappell C.R.* A statistical characterization of plasmasphere density structure and boundary location // *J. Geophys. Res.* V. 95. № A6. P. 7937–7947. 1990.
<https://doi.org/10.1029/JA095iA06p07937>
- *Kotova G., Bezrukikh V., Verigin M., Šmilauer J.* In situ observations of low-density regions inside the plasmasphere // *Earth, Planets and Space.* V. 56. P. 989–996. 2004.
<https://doi.org/10.1186/BF03351796>
- *Kotova G., Bezrukikh V., Verigin M.* The effect of the Earth’s optical shadow on thermal plasma measurements in the plasmasphere // *J. Atm. Solar-Terr. Phys.* V. 120. P. 9–14. 2014.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2014.08.013>
- *Kotova G., Verigin M., Lemaire J., Pierrard V., Bezrukikh V., Šmilauer 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>
- *Lemaire J.F., Gringauz K.I.*, with contributions from Carpenter D.L. and Bassolo V. *The Earth’s Plasmasphere*, 350 pp., Cambridge Univ. Press, New York. 1998.
<https://doi.org/10.1017/CBO9780511600098>
- *Lemaire J.F.* Hydrostatic equilibrium and convective stability in the plasmasphere // *J. Atm. Solar-Terr. Phys.* V. 61. № 11. P. 861–878. 1999.
[https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(99\)00044-9](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(99)00044-9)
- *Newcomb W.A.* Convective instability induced by gravity in a plasma with a frozen-in magnetic field // *Physics of Fluids.* V. 4. P. 391–396. 1961.
<https://doi.org/10.1063/1.1706342>
- *Sandel B.R., Goldstein J., Gallagher D.L., Spasojevic M.* Extreme ultraviolet imager observations of the structure and dynamics of the plasmasphere // *Space Sci. Rev.* V. 109. P. 25–46. 2003.
https://doi.org/10.1007/978-94-010-0027-7_2
- *Verbanac G., Pierrard V., Bandic M., Darrouzet F., Rauch J.-L., Décreau P.* The relationship between plasmopause, solar wind and geomagnetic activity between 2007 and 2011 // *Ann. Geophys.* V. 33. P. 1271–1283. 2015.
<https://doi.org/10.5194/angeo-33-1271-2015>