

УДК 550.338.1

## ДАВЛЕНИЕ ИОНОВ В РАЗЛИЧНЫХ ОБЛАСТЯХ АВРОРАЛЬНЫХ ВЫСЫПАНИЙ ДНЕВНОГО СЕКТОРА

© 2020 г. В. Г. Воробьев<sup>1, \*</sup>, О. И. Ягодкина<sup>1</sup>, Е. Е. Антонова<sup>2, 3</sup><sup>1</sup>Полярный геофизический институт (ПГИ), г. Апатиты (Мурманская обл.), Россия<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына  
Московского государственного университета

им. М.В. Ломоносова (НИИЯФ МГУ), г. Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), г. Москва, Россия

\*e-mail: vorobjev@pgia.ru

Поступила в редакцию 19.04.2020 г.

После доработки 22.04.2020 г.

Принята к публикации 21.05.2020 г.

По данным низкоорбитальных спутников DMSP F6 и F7 исследовано давление ионов в областях ионосферных проекций плазменной мантии, полярного каспа, низкоширотного граничного слоя и в области структурированных высыпаний аврорального овала. Показано, что во всех исследуемых областях высыпаний уровень давления ионов не зависит ни от полярности, ни от величины  $Bz$ -компоненты ММП. Давление в мантии изменяется в диапазоне от 0.02 до 0.06 нПа и не зависит от величины динамического давления солнечного ветра. Средний уровень давления  $\langle P_m \rangle = 0.03 \pm 0.01$  нПа. В области каспа при  $Bz$  ММП  $> 0$  давление ионов  $P_c$  не зависит от динамического давления солнечного ветра, в то время, как при  $Bz$  ММП  $< 0$  наблюдается значительное увеличение давления с ростом динамического давления солнечного ветра. Средний уровень давления  $\langle P_c \rangle = 1.0 \pm 0.3$  нПа, что почти на два порядка выше, чем в мантии. В высыпаниях  $LLBL$  и в области высыпаний аврорального овала давление ионов также увеличивается с ростом динамического давления солнечного ветра. Средний уровень давления в  $LLBL$   $\langle P_L \rangle = 0.27 \pm 0.07$  нПа, а в области аврорального овала составляет в среднем  $\sim 0.5$  от этого уровня. Распределение давления по MLT в  $LLBL$  демонстрирует ярко выраженное локальное увеличение давления в полуденном секторе ( $\sim 11$ – $14$  MLT), величина которого растет с увеличением динамического давления солнечного ветра. В области аврорального овала давление по MLT распределено достаточно равномерно, в результате чего в полуденном секторе появляется значительная разность давлений ( $\Delta P = P_L - P_A$ ) между областями низкоширотного граничного слоя и аврорального овала.

DOI: 10.31857/S0016794020060140

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Давление плазмы является одним из основных параметров, определяющих состояние магнитосферы Земли и динамические процессы, протекающие в системе магнитосфера–ионосфера. Достаточно упомянуть, что азимутальные градиенты давления в плазменном слое способны поддерживать продольные токи посредством которых осуществляется связь между магнитосферой и ионосферой [Antonova and Ganushkina, 1997; Troshichev, 2004; Xing et al., 2009]. Давление плазмы определяется *in situ* с помощью спутников, находящихся в магнитосферной плазме, или по наблюдениям низкоорбитальных спутников с полярной орбитой. Использование данных низкоорбитальных спутников, орбиты которых с большим пространственно-временным разрешением покрывают фактически всю высокоширотную ионо-

сферу, основывается на том, что в области изотропной плазмы ее давление, температура и плотность остаются постоянными вдоль силовых линий геомагнитного поля [Goertz and Baumjohann, 1991]. Таким образом, характеристики магнитосферной плазмы можно получить проектируя ионосферные данные в экваториальную плоскость магнитосферы с использованием какой-либо модели магнитного поля.

На высотах ионосферы все высыпания, регистрируемые в пределах границ аврорального овала, рассматриваются как изотропные. В работах [Антонова и др., 2014; Кирпичев и др., 2016] методом морфологического проецирования определено положение полярной и экваториальной кромок аврорального овала в экваториальной плоскости магнитосферы. Показано, что в предположении справедливости условия магнитостатического

равновесия при низком уровне магнитной активности ( $AL > -200$  нТл) экваториальная и полярная кромки ночного аврорального овала располагаются на геоцентрических расстояниях  $\sim 7 R_e$  и  $\sim 10 R_e$ , соответственно. Ранее, в работе [Кирпичев и Антонова, 2011] по наблюдениям спутников проекта THEMIS было показано, что на геоцентрических расстояниях  $7-10 R_e$  давление плазмы близко к изотропному и азимутально-симметричному.

Давление плазмы в плазменном слое в значительной мере определяется динамическим давлением солнечного ветра ( $P_{sw}$ ). В центральной части плазменного слоя на геоцентрических расстояниях  $10-50 R_e$  давление плазмы увеличивается примерно пропорционально росту  $P_{sw}$  [Tsyganenko and Mukai, 2003]. В работе [Воробьев и др., 2019] по наблюдениям низкоорбитальных спутников показано, что при всех уровнях магнитной активности давление плазмы на границах авроральных высыпаний почти линейно возрастает с ростом  $P_{sw}$ , при этом не только в области изотропных высыпаний, но и области захвата, экваториальнее границы изотропизации ( $b2i$ ).

Еще в ранних исследованиях [Fairfield, 1968] было показано, что в дневные часы проекция границы овала полярных сияний вдоль геомагнитных силовых линий примерно совпадает с границей магнитосферы. Процессы, протекающие на дневной магнитопаузе и в пограничных слоях магнитосферы, интенсивно исследуются в связи с решением проблемы переноса энергии солнечного ветра в магнитосферу Земли. Влияние динамического давления солнечного ветра на состояние дневной магнитосферы хорошо иллюстрируют результаты работы [Newell and Meng, 1994], в которой по данным спутников серии DMSP изучались ионосферные проекции различных областей магнитосферы при низком и высоком уровнях  $P_{sw}$ . Авторами этой работы было показано, что динамическое давление солнечного ветра драматически меняет картину магнитосферных проекций. При большом динамическом давлении,  $\langle P_{sw} \rangle = 6$  нПа, значительно увеличиваются долготные размеры областей регистрации выпающих частиц, характерных для таких областей как мантия, полярный касп, низкоширотный граничный слой, изменяется конфигурация области структурированных высыпаний аврорального овала.

Скорость солнечного ветра меняется в относительно небольших пределах, поэтому его кинетическое давление определяется, главным образом, плотностью плазмы. Характеристики частиц в различных областях вторжений дневного сектора в зависимости от плотности плазмы солнечного ветра исследовалось в работе [Воробьев и Ягодкина, 2006]. По данным спутников DMSP F6 и F7

было показано, что с ростом плотности плазмы солнечного ветра наблюдается значительное увеличение потоков выпающих ионов во всех областях дневных высыпаний. Однако в зоне структурированных высыпаний аврорального овала и в зоне мягких диффузных высыпаний одновременно с ростом потоков наблюдается уменьшение средней энергии выпающих ионов. Давление плазмы на высотах ионосферы, определяемое как потоками выпающих частиц, так и их средней энергией, в дневные часы до настоящего времени не исследовалось.

Еще в ранних работах [Vorobjev et al., 1976; Horwitz and Akasofu, 1977] была обнаружена тесная связь поведения дневных сияний с  $B_z$ -компонентой ММП. Было показано, что уменьшение (увеличение)  $B_z$  сопровождается смещением сияний в более низкие (высокие) широты. Детальное сопоставление вариаций ММП и положения сияний показало [Vorobjev et al., 1976; Sandholt et al., 1983], что отклик дневных сияний запаздывает на  $\sim 15$  мин относительно соответствующих изменений  $B_z$  в солнечном ветре на орбите Земли. Высокая корреляция между вариациями  $B_z$ -компоненты ММП и крупномасштабными изменениями положения полярного каспа была отмечена в работах [Burch, 1973; Newell et al., 1989 и других].

Целью настоящей работы является определение давления плазмы на высотах ионосферы в различных областях высыпаний дневного сектора: мантия, полярный касп, низкоширотный граничный слой и высыпания аврорального овала. Такое исследование позволит оценить роль давления плазмы в пограничных слоях магнитосферы и каспе в балансе давлений на магнитопаузе. Будет проведено сопоставление средних значений давления выпающих ионов в различных областях высыпаний и исследовано влияние  $B_z$ -компоненты ММП и динамического давления солнечного ветра на уровень давления плазмы.

## 2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

В работе использованы данные спутников DMSP F6 и F7 за полный 1986 г. Это был год спокойного Солнца в самом начале 22 цикла солнечной активности. Спутники имели почти круговую орбиту с высотой около 850 км, наклонение орбиты  $99^\circ$ , период обращения  $\sim 101$  мин. Изменялись потоки выпающих частиц в диапазоне энергий от 32 эВ до 30 кэВ в 20-и каналах, распределенных по энергиям в логарифмической последовательности. Для определения положения границ авроральных высыпаний и времени их регистрации использовались данные автоматизированной системы обработки [Newell et al., 1991a], которые представлены на (<http://civspace.jhuapl.edu>). Данные спутников в автома-

тизированной системе спроецированы вдоль силовых линий на высоту 110 км.

Давление, создаваемое потоками высыпавшихся ионов, значительно превосходит давление электронов, которое составляет менее 15% общего давления плазмы. Методика определения ионного давления по измерениям спутников серии DMSP была изложена в статье Wing and Newell [1998]. Нами использован модифицированный вариант этой методики, предложенный в работах [Stepanova et al., 2002, 2006]. Определялись средние потоки и энергии ионов между соседними границами различных зон дневных высыпаний, на основании которых рассчитывалась величина ионного давления. Чтобы избежать влияния процессов, связанных с развитием магнитосферных возмущений, рассматривались данные спутников только при низком уровне магнитной активности  $AL > -200$  нТл. Данные магнитной активности, а также параметры плазмы солнечного ветра и ММП были взяты на портале OMNIWeb (<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>). Всего при  $|AL| < 200$  нТл зарегистрировано 4460 пролетов спутника DMSP F7 в секторе 09:00–15:00 MLT северного и южного полушарий; дополнительно использовались данные спутника DMSP F6 в вечернем и утреннем секторах.

### 3. ДАВЛЕНИЕ ИОНОВ В РАЗЛИЧНЫХ ОБЛАСТЯХ ВЫСЫПАНИЙ

На дневной стороне область мягких высыпаний создается высыпавшими частицами различных типов. Для определения области магнитосферного источника различных типов высыпаний в работах [Newell et al., 1991b, 1991c] проведено сравнение характеристик высыпаний, наблюдаемых на спутниках серии DMSP, с характеристиками частиц на больших высотах. В дневном секторе выделено четыре различные области: плазменная мантия, полярный касп, низкоширотный граничный слой и область структурированных высыпаний аврорального овала, именуемая как “традиционный граничный плазменный слой” в [Newell et al., 1991a]. Ниже представлены результаты изучения ионного давления во всех поименованных выше структурах. Исследовалось влияние динамического давления солнечного ветра и  $Bz$ -компоненты ММП на величину ионного давления при низком уровне магнитной активности.

#### 3.1. Плазменная мантия

В области мантии энергия высыпавшихся ионов невелика и составляет всего несколько десятков эВ [Newell et al., 1991b]. Чтобы определить пороговый уровень давления, определяемого спутниками F6 и F7, мы рассмотрели канал  $E_2$  электростатического анализатора, измеряющий

потоки ионов с энергией 47 эВ (канал  $E_1 = 32$  эВ временами давал сбой). Пороговый уровень потока энергии в этом канале  $F_i = 10^{6.5}$  (эВ/см<sup>2</sup> с ст). Округлив эти значения до 50 эВ и  $10^7$  (эВ/см<sup>2</sup> с ст) соответственно, получим пороговый уровень измеряемого ионного давления  $P = 0.001$  нПа. Для работы с более достоверными данными мы искусственно увеличили пороговые значения на порядок до  $P = 0.01$  нПа. В результате такой процедуры осталось 856 пролетов, в которых были зарегистрированы высыпания, характерные для плазменной мантии при наличии данных о плазме солнечного ветра и ММП.

На рисунке 1 показаны уровни ионного давления в высыпаниях мантии ( $P_m$ ) при разных значениях  $Bz$ -компоненты ММП (а) и кинетического давления плазмы солнечного ветра (б). Как видно из рисунка, уровень давления в мантии изменяется, главным образом, в диапазоне от 0.02 нПа до 0.06 нПа и не зависит ни от полярности ММП, ни от динамического давления солнечного ветра. Средний уровень давления  $\langle P_m \rangle = 0.03 \pm 0.01$  нПа. Значительный разброс значений  $P_m$  на рис. 1 может быть связан как с величинами  $V_x$  и  $V_y$  компонент ММП, так и с углом наклона оси геомагнитного диполя к вектору скорости солнечного ветра (полушарие, сезон, время UT).

#### 3.2. Полярный касп

В дневной части магнитосферы существуют области (по одной в каждом полушарии), в которых геомагнитные силовые линии разделяются на две группы: одни замыкаются на стороне магнитосферы, обращенной к Солнцу, а другие протягиваются от полярной шапки в магнитный хвост. Эти области называются дневными полярными (магнитными) каспами. Характерной особенностью каспов является то обстоятельство, что основные параметры плазмы в них и в переходном слое между магнитопаузой и земной ударной волной чрезвычайно схожи. Это позволяет считать, что частицы солнечного ветра проникают через каспы внутрь магнитосферы и высыпаются в атмосферу без существенных ускорений.

В каспе поток энергии высыпавшихся ионов составляет  $F_i > 10^{10}$  (эВ/см<sup>2</sup> с ст), а их средняя энергия  $300 \text{ эВ} < E_i < 3000 \text{ эВ}$  [Newell et al., 1989]. Выбор критериев идентификации каспа для автоматизированной системы обработки данных обсуждался в работе [Newell and Meng, 1994]. Всего за 1986 г. в секторе 12:00 MLT–15:00 MLT было зарегистрировано 798 пролетов, в которых были обнаружены высыпания полярного каспа, что составляет 14% от общего числа пролетов спутников в этом секторе MLT – 5667. При низком уровне магнитной активности и при наличии

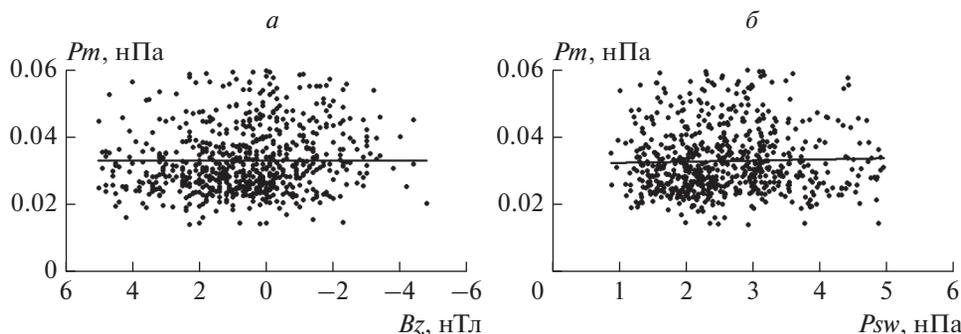


Рис. 1. Давление ионов в области высыпаний мантии ( $P_m$ ) при разных значениях  $B_z$ -компоненты ММП (а) и динамического давления плазмы солнечного ветра (б).

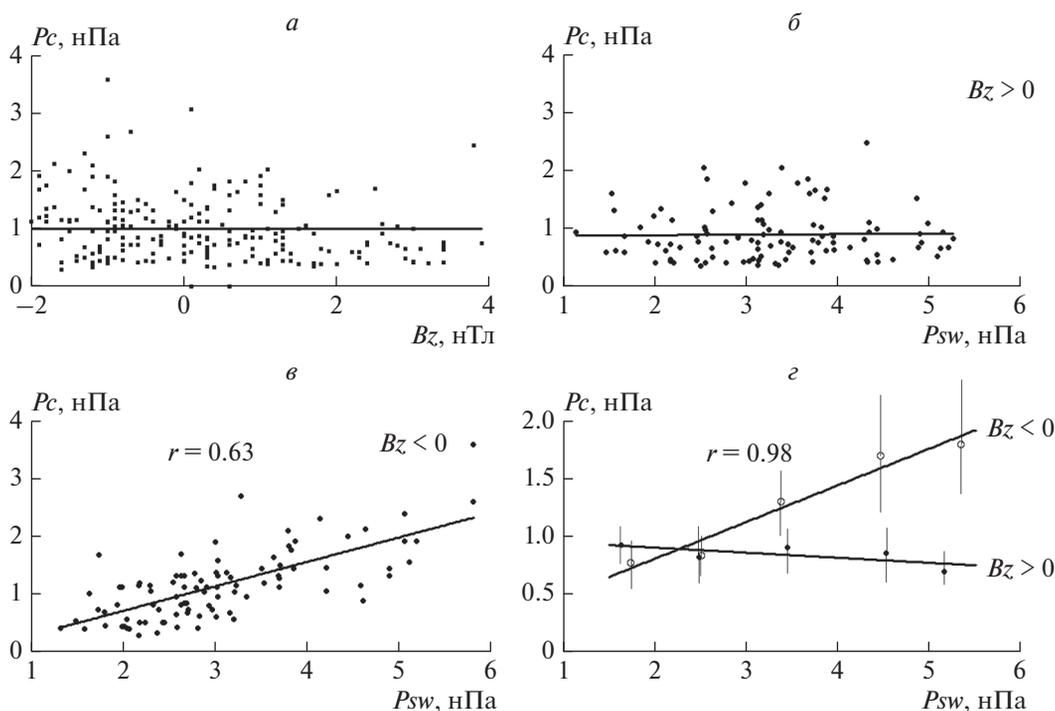


Рис. 2. Давление ионов в области высыпаний каспа ( $P_c$ ) при разных значениях  $B_z$ -компоненты ММП (а); в зависимости от динамического давления солнечного ветра при  $B_z > 0$  (б) и при  $B_z < 0$  (в). (г) – то же, что и на рис. 2б, 2в, но данные усреднены в каждом интервале  $P_{sw}$  по 1 нПа.

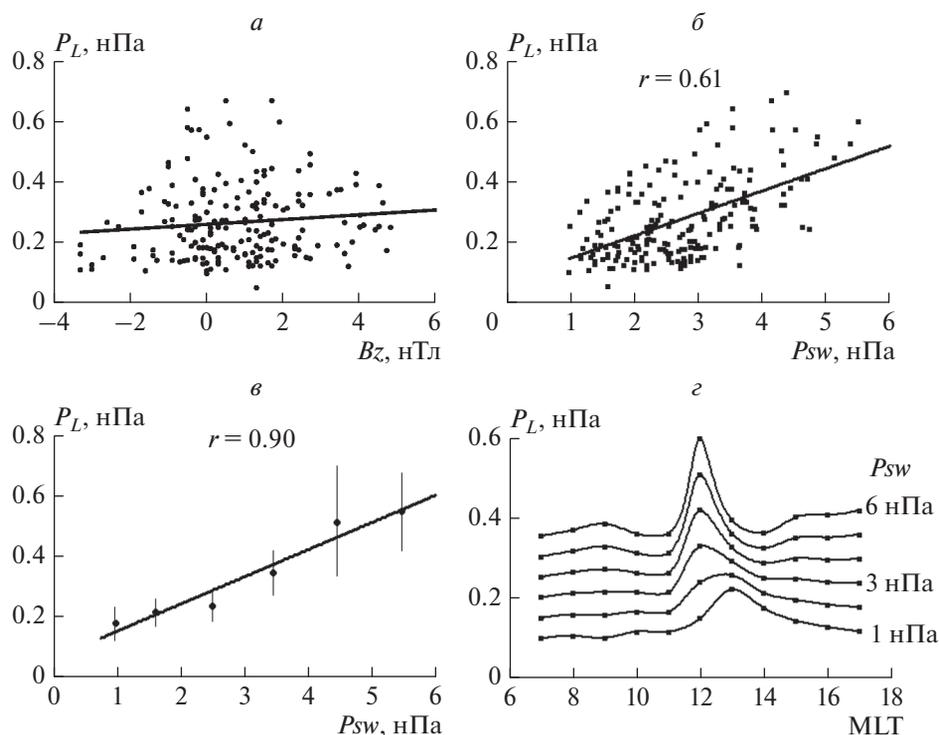
данных о ММП и плазме солнечного ветра зарегистрировано 219 пролетов, диагностирующих касп.

Результаты определения ионного давления в каспе ( $P_c$ ) показаны на рис. 2. Рисунок 2а иллюстрирует уровни ионного давления при разных значениях  $B_z$ -компоненты ММП. Как и в случае с плазменной мантией, давление в каспе не зависит ни от полярности, ни от величины  $B_z$ -компоненты. Средний уровень давления в каспе  $\langle P_c \rangle = 1.0 \pm 0.3$  нПа, что почти на два порядка выше, чем в мантии.

На рисунке 2б показано давление в каспе в зависимости от динамического давления солнечного

го ветра при  $B_z$  ММП  $> 0$ , а на рис. 2в при  $B_z < 0$ . Как видно из рисунков, при положительной полярности ММП давление плазмы в области высыпаний каспа не зависит от динамического давления солнечного ветра, в то время как при  $B_z$  ММП  $< 0$  наблюдается значительное увеличение давления с ростом  $P_{sw}$ . При уровне динамического давления в 1.5 нПа ионное давление составляет  $\sim 0.5$  нПа, а при  $P_{sw} = 5$  нПа увеличивается примерно до  $\sim 2.0$  нПа. Сплошные линии на рис. 2а, 2б и 2в соответствуют уравнениям линейной регрессии.

На рисунке 2г показана зависимость давления в каспе от динамического давления солнечного



**Рис. 3.** Давление ионов в области высыпаний *LLBL* ( $P_L$ ) при разных значениях  $B_z$ -компоненты ММП (*a*); в зависимости от динамического давления солнечного ветра (*б*); (*в*) – то же, что и на рис. 3*б*, но данные усреднены в интервалах  $P_{sw}$  по 1 нПа; (*г*) – распределение давления по MLT при разных уровнях  $P_{sw}$  (от 1.0 нПа до 6.0 нПа).

ветра с использованием тех же данных, что и на рис. 2*б* и 2*в*, но данные усреднены в каждом интервале  $P_{sw}$  по 1 нПа. Этот рисунок, как и рис. 2*б*, показывает, что при  $B_z$  ММП  $> 0$  давление в каспе ( $P_c$ ) не зависит от динамического давления солнечного ветра. При  $B_z$  ММП  $< 0$  увеличение давления в каспе с ростом  $P_{sw}$  описывается уравнением линейной регрессии:  $P_c(B_z < 0) = 0.32 P_{sw} + 0.18$ . Отрезками вертикальных линий показаны среднеквадратичные отклонения. Коэффициент корреляции  $r = 0.97$  для данных на рис. 2*г* и  $r = 0.63$  при использовании всех экспериментальных точек (рис. 2*в*).

### 3.3. Низкоширотный граничный слой (*LLBL*)

Низкоширотный граничный слой (*LLBL* – low-latitude boundary layer) является граничной областью дневной магнитосферы, в которой регистрируются частицы, как переходного слоя, так и частицы магнитосферного происхождения. Соответственно, поток энергии высыпавшихся ионов в *LLBL* примерно на порядок меньше, чем в области каспа, а средняя энергия ионов выше и составляет в среднем 3–6 кэВ. Характеристики частиц, наблюдаемых в граничном слое, детально изложены в работах [Haerendel et al., 1978; Newell et al., 1991c].

Результаты исследования ионного давления в области высыпаний *LLBL* представлены на рис. 3. Так как характеристики плазмы в граничном слое магнитосферы могут существенно зависеть от угла между направлением на Солнце и нормалью к магнитопаузе, для исследований был выбран более узкий интервал местного геомагнитного времени, 11:00–13:00 MLT. В этом интервале при низком уровне магнитной активности с условием наличия данных о параметрах солнечного ветра и ММП было обнаружено 262 пролета спутника F7, в которых регистрировались высыпания граничного слоя.

Рисунок 3*а* показывает, что, как и в плазменной мантии и в полярном каспе, давление в области высыпаний *LLBL* ( $P_L$ ) не зависит от  $B_z$ -компоненты ММП. Средний уровень давления составляет  $\langle P_L \rangle = 0.27 \pm 0.07$  нПа, что существенно выше, чем в мантии, но примерно 3 раза ниже, чем в каспе.

Зависимость ионного давления в *LLBL* от динамического давления солнечного ветра иллюстрирует рис. 3*б*. Как видно на рисунке, давление ионов существенно увеличивается с ростом  $P_{sw}$ . Сплошная линия соответствует уравнению линейной регрессии, коэффициент корреляции по всем точкам массива данных  $r = 0.61$ . На рисунке 3*в* представлены те же данные, что и на рис. 3*б*, но

усредненные в каждом интервале динамического давления по 1 нПа. Сплошная линия на рисунке соответствует уравнению:  $P_L = 0.10 P_{sw} + 0.06$  (коэффициент корреляции  $r = 0.90$ ), которое показывает рост  $P_L$  от  $\sim 0.15$  нПа при давлении солнечного ветра в 1.0 нПа до  $\sim 0.65$  нПа при  $P_{sw} = 6.0$  нПа.

Рисунок 3г иллюстрирует распределение давления в высыпаниях граничного слоя по MLT при разных уровнях динамического давления солнечного ветра (от 1.0 до 6.0 нПа). Точки на графиках соответствуют уравнениям регрессии, которые были получены для всех, показанных на рисунке, секторов MLT. Данные в 12:00 MLT соответствуют уравнению регрессии для сектора 11:00–13 MLT. Затем аналогичные линейные уравнения  $P_L = P_L(P_{sw})$  были получены для всех 2-х часовых интервалов MLT со сдвигом на 1ч в восточном и западном направлениях (12:00–14:00, 13:00–15:00... 12:00–10:00, 11:00–09:00 MLT и т.д.).

Рисунок 3г демонстрирует ярко выраженное локальное увеличение ионного давления в полуденном секторе, величина которого растет с увеличением  $P_{sw}$ . При  $P_{sw} = 6$  нПа величина пика  $P_L$  примерно в два раза превышает уровень давления в соседних секторах MLT, что существенно выше величины стандартного среднеквадратичного отклонения, типичного для наших массивов данных.

### 3.4. Область высыпаний аврорального овала (AOP)

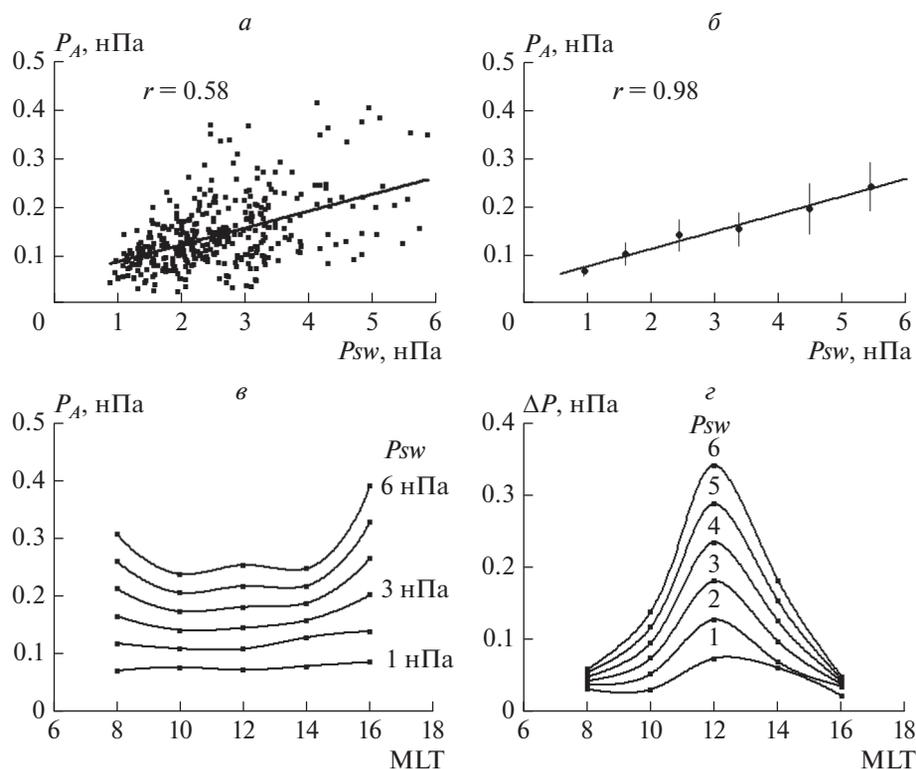
Терминологически область AOP (auroral oval precipitation) была введена в работе [Старков и др., 2002]. В дневном секторе эта область пространственно совпадает с высыпаниями типа BPS (“традиционный граничный плазменный слой”) в работе [Newell et al., 1991a]. Потребность введения нового обозначения продиктована в данном случае необходимостью отказаться от прямого сопоставления области высыпаний, зарегистрированных на высотах ионосферы, с каким либо магнитосферным доменом. С одной стороны непонятно, что означает “граничный плазменный слой” применительно к дневной магнитосфере. С другой стороны, однозначного толкования взаимосвязи между дневным сектором аврорального овала и каким-либо его магнитосферным источником пока не достигнуто.

Характерными для области AOP являются большие потоки мягких (<1 кэВ) структурированных высыпаний. Здесь наблюдаются лучистые дуги сияний, а при низком уровне магнитной активности - короткоживущие (1–2 мин) лучистые формы и отдельные лучи. В целом, характеристики высыпаний в дневной области AOP подобны характеристикам высыпаний в приполюсной части ночного аврорального овала.

Основные результаты, полученные при изучении ионного давления ( $P_A$ ) в области AOP, иллюстрирует рис. 4. Отметим, что, как и во всех рассмотренных выше областях высыпаний, давление в AOP не зависит ни от полярности, ни от величины  $B_z$ -компоненты ММП (не показано). На рисунке 4а представлен массив данных, показывающий распределение  $P_A$  относительно динамического давления солнечного ветра в секторе 11:00–13:00 MLT. В этом секторе при низком уровне магнитной активности было зарегистрировано 577 пролетов, в которых наблюдались характерные для AOP высыпания. Рисунок 4а указывает на определенную тенденцию к увеличению давления ионов с ростом динамического давления солнечного ветра. Сплошная линия на рисунке соответствует уравнению линейной регрессии с коэффициентом корреляции по всему массиву данных  $r = 0.58$ . Среднее значение ионного давления,  $\langle P_A \rangle = 0.14 \pm 0.03$  нПа, что составляет  $\sim 0.5$  от уровня давления в высыпаниях LLBL. Те же данные, что и на рис. 4а, но усредненные в каждом интервале  $P_{sw}$  по 1 нПа, представлены на рис. 4б. Сплошная линия на этом рисунке соответствует уравнению:  $P_A = 0.036 P_{sw} + 0.030$  с коэффициентом корреляции  $r = 0.98$ . В соответствии с этим уравнением ионное давление в AOP увеличивается примерно в 4 раза от  $\sim 0.08$  нПа до  $\sim 0.25$  нПа при изменении  $P_{sw}$  от 1.0 до 6.0 нПа.

На рисунке 4в показано распределение AOP давления по MLT для разных уровней динамического давления солнечного ветра. Графики построены согласно уравнениям линейной регрессии, полученным усреднением данных в каждом из 2-х часовых интервалов сектора 07:00–17:00 MLT. Полученные в каждом интервале значения отнесены к центру соответствующего 2-х часового MLT интервала. Рисунок показывает, что  $P_A$  распределено достаточно равномерно в полуденном секторе, но несколько увеличивается в сторону вечерних и утренних часов MLT при высоких уровнях  $P_{sw}$ . В полуденном секторе здесь не наблюдается каких-либо ярких особенностей, обнаруженных ранее в области высыпаний LLBL. Разность ионного давления между областями LLBL и AOP ( $\Delta P = P_L - P_A$ ) иллюстрирует рис. 4г. Рисунок показывает, что с увеличением динамического давления солнечного ветра в полуденном секторе существенно увеличивается разница в давлении между высыпаниями граничного слоя и высыпаниями овала полярных сияний. При  $P_{sw} = 6$  нПа разность давлений не только соизмерима, но и превышает уровень давления в самой области AOP.

Сопоставление уровней ионного давления в полуденном секторе (рис. 4б) AOP с величиной давления на приполюсной кромке овала сияний в предполуночном секторе (21:00–24:00 MLT) при



**Рис. 4.** Давление ионов в области высыпаний *AOP* ( $P_A$ ) при различных значениях динамического давления солнечного ветра (*a*); (*b*) – то же, что и на рис. 4*a*, но данные усреднены в интервалах  $P_{sw}$  по 1 нПа; (*c*) – распределение давления по *MLT* при разных уровнях  $P_{sw}$ ; (*d*) *MLT*-распределение разности давлений между областями *LLBL* и *AOP*.

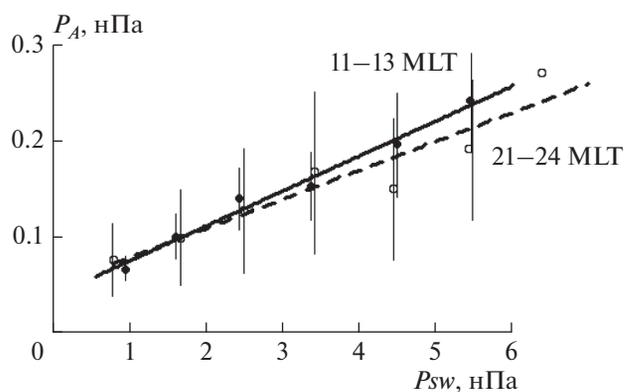
разных уровнях динамического давления солнечного ветра иллюстрирует рис. 5. Сплошная и штриховая линии на рисунке соответствуют уравнениям регрессии для полуденного и полуночного секторов, соответственно. Отрезками вертикальных линий показаны среднеквадратичные отклонения. Так как величина давления определяется средними значениями энергии и потоков энергии высыпавшихся частиц, графики на рис. 5 показывают, что при низком уровне магнитной активности характеристики авроральных частиц (протонов), высыпавшихся в полуденном секторе *AOP*, подобны характеристикам высыпаний на приполюсном крае *AOP* в полуночном секторе.

#### 4. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Данные спутников *DMSF F 6* и *F 7* использованы для изучения ионного давления в дневном секторе в областях ионосферных проекций плазменной мантии, полярного каспа, *LLBL* и в области структурированных высыпаний аврорального овала (*AOP*). Исследовано влияние  $B_z$ -компоненты ММП и динамического давления солнечного ветра ( $P_{sw}$ ) на уровень давления плазмы в различ-

ных областях высыпаний при низком уровне магнитной активности ( $AL > -200$  нТл).

Основные результаты, полученные в рамках проведенных статистических исследований, можно сформулировать следующим образом.



**Рис. 5.** Давления ионов в полуденном секторе (сплошная линия) *AOP* и на приполюсной кромке овала сияний в полуночном секторе (штриховая линия) в зависимости от динамического давления солнечного ветра.

1. Давление ионов в области мантии изменяется, главным образом, в диапазоне от 0.02 нПа до 0.06 нПа и не зависит ни от полярности ММП, ни от динамического давления солнечного ветра. Средний уровень давления  $\langle P_m \rangle = 0.03 \pm 0.01$  нПа.

2. Давление в области каспа не зависит от величины  $B_z$ -компоненты ММП. Средний уровень давления  $\langle P_c \rangle = 1.0 \pm 0.3$  нПа, что почти на два порядка выше, чем в мантии. При положительной полярности ММП давление в области высыпаний каспа не зависит от динамического давления солнечного ветра, в то время как при  $B_z < 0$  наблюдается значительное увеличение давления с ростом  $P_{sw}$ .

3. Как и в плазменной мантии, и в полярном каспе, давление в области высыпаний *LLBL* не зависит от уровня вертикальной компоненты ММП, но существенно увеличивается с ростом динамического давления от  $\sim 0.15$  нПа при  $P_{sw} = 1.0$  нПа до  $\sim 0.65$  нПа при  $P_{sw} = 6.0$  нПа. Средний уровень давления составляет  $\langle P_L \rangle = 0.27 \pm 0.07$  нПа.

4. Распределение давления в высыпаниях *LLBL* по MLT демонстрирует ярко выраженное локальное увеличение давления в полуденном секторе ( $\sim 11-14$  MLT), величина которого растет с увеличением  $P_{sw}$ . При  $P_{sw} = 6$  нПа величина пика  $P_L$  примерно в два раза превышает уровень давления в соседних секторах MLT.

5. Давление в области высыпаний аврорально-го овала (*AOP*), как и во всех рассмотренных выше областях высыпаний, не зависит от  $B_z$ -компоненты ММП, но существенно увеличивается с ростом  $P_{sw}$ . Среднее значение давления здесь оставляет  $\sim 0.5$  от уровня давления в высыпаниях *LLBL*.

6. Давление в *AOP* по местному геомагнитному времени в полуденные часы распределено достаточно равномерно, в результате чего в секторе  $\sim 10-14$  MLT появляется значительная разность давлений между областями *LLBL* и *AOP*. При  $P_{sw} \sim 4-6$  нПа разность давлений ( $\Delta P = P_L - P_A$ ) соизмерима с уровнем давления в самой области *AOP*.

7. При низком уровне магнитной активности,  $|AL| < 200$  нТл, характеристики авроральных ионов (протонов), высыпавшихся в полуденном секторе *AOP*, подобны характеристикам высыпаний на приполюсном крае *AOP* в полуночном секторе.

Плазменная мантия, касп и низкоширотный граничный слой находятся непосредственно под магнитопаузой — внешней границей магнитосферы. С момента выделения магнитопаузы эта область определялась как токовый слой, при пересечении которого выполняется баланс полного давления. Однако ранее проводилось сравнительно мало экспериментальных исследований условий такого баланса, что связано с высоким

уровнем турбулентности в магнитослое (magnetosheath) даже при наличии одновременных наблюдений на нескольких спутниках [Panov et al., 2008]. Полученные в настоящей работе результаты статистического анализа давления в погранслоях и каспе, таким образом, крайне полезны для выяснения механизмов формирования магнитопаузы и описания ее динамики.

Можно отметить, что обычно используемые представления о роли магнитного пересоединения в формировании каспа и погранслоев (см., например, [Haerendel et al., 1978; Gosling et al., 1991]) встречается с многочисленными трудностями. Магнитопауза постоянно движется и ее положение в каждой точке определяется локальным балансом давлений. В работах [Lemaire, 1977; Roth, 1992] рассмотрены модели импульсного проникновения плазмы магнитослоя внутрь магнитосферы, которые, однако, до настоящего времени не имеют удовлетворительного теоретического обоснования. Высокий уровень турбулентности в магнитослое [Rossolenko et al., 2007; Россоленко и др., 2008] приводит к существенным отличиям в величине и направлении магнитного поля в разных точках магнитопаузы, являющимся основным параметром в теориях пересоединения. Движения типа резких скачков магнитопаузы возникают при резких изменениях токов внутри магнитосферы [Пулинец и др., 2016]. При движении магнитопаузы от Земли часть плазмы магнитослоя оказывается внутри магнитосферы. Но такие динамические процессы пока мало исследованы.

В магнитоспокойные периоды при стабильных условиях в солнечном ветре исследовались пересечения магнитопаузы, когда она движется медленно. Дисбаланс давлений на магнитопаузе в этих событиях очень невелик. Так, в одном из пролетов спутников TEMIS, описанном в работе [Знаткова и др., 2011], дисбаланс давлений не превышал 3%. Необходимо отметить, что условие замороженности не применимо при описании медленных движений плазмы и соблюдении условия баланса давлений [Арцимович и Сагдеев, 1979]. Поэтому в настоящем исследовании процессы, описываемые в рамках теории пересоединения при локальных нарушениях замороженности, не рассматриваются.

Плазменная мантия примыкает к магнитопаузе в основном на флангах магнитосферы. Величина давления в плазменной мантии намного меньше давления магнитного поля в долях хвоста магнитосферы. Откуда следует, что баланс давлений на магнитопаузе поддерживается практически полностью магнитным полем, создаваемым токами замыкания в хвосте магнитосферы.

В области каспа происходит прямое проникновение плазмы магнитослоя внутрь магнито-

сферы вплоть до ионосферных высот, и, в силу высокого уровня турбулентности, давление примерно изотропно. В каспе около магнитопаузы величина магнитного поля незначительная, и баланс давлений на магнитопаузе со стороны магнитосферы поддерживается, в основном, за счет давления плазмы. Со стороны магнитосферы велик вклад динамического давления, которое определяется динамическим давлением солнечного ветра. Анализ баланса давлений на магнитопаузе требует определения нормали к магнитопаузе. Но при близости давления плазмы к изотропному, давление постоянно вдоль магнитной силовой линии. В настоящем исследовании  $P_c(B_z < 0) = 0.32 P_{sw} + 0.18$ , что дает угол между направлением нормали к магнитопаузе и солнечным ветром  $\sim 56^\circ$ . Эта величина примерно соответствует результатам исследований [Panov et al., 2008]. Таким образом, данная оценка подтверждает доминирующий вклад давления плазмы в каспе в баланс давления на магнитопаузе.

При  $B_z$  ММП  $> 0$  касп в области магнитопаузы и на высотах ионосферы регистрируется в максимально высоких широтах, где зависимость давления от величины динамического давления солнечного ветра практически не проявляется. Средний уровень ионного давления при  $B_z$  ММП  $> 0$  составляет для всех исследованных событий 0.9 нПа, в то время как при отрицательной полярности ММП  $\langle P_c \rangle = 1.2$  нПа.

При определении давления плазмы в экваториальной плоскости с использованием данных миссии THEMIS в работах [Кирпичев и Антонова, 2011; Antonova et al., 2013, 2014] LLBL не выделялся. Поэтому полученные в настоящей работе результаты по давлению плазмы в LLBL являются пока единственными. Полученные величины давления в зависимости от динамического давления солнечного ветра подтверждают определяющий вклад земного диполя в баланс давлений под магнитопаузой в экваториальной плоскости. Однако, надо отметить, что на магнитосферных флангах в экваториальной плоскости [Antonova et al., 2018, Fig. 2] основной вклад в баланс давлений на магнитопаузе вносит давление плазмы.

Представляют интерес результаты сравнения величин ионного давления между областями высыпаний LLBL и AOP. Разность давления между этими областями, представленная на рис. 4з, может свидетельствовать о наличии значительных радиальных градиентов, “желоба” давления плазмы в полуденном секторе магнитосферы. Ионосферные наблюдения указывают на то, что по направлению к Земле от подсолнечной магнитопаузы достаточно высокое давление в области LLBL сначала может быстро уменьшаться к уровню давления в области проекции AOP, а затем начнется более плавный естественный рост давления

с уменьшением расстояния до Земли. Радиальные масштабы такой вариации давления можно примерно оценить по ширине областей высыпаний LLBL и AOP ( $1^\circ$  широты соответствует  $\sim 1$  Re), которая при  $B_z$  ММП  $> 0$  составляет  $\sim 2^\circ$  широты каждая [Vorobjev et al., 2013, Fig. 7]. Однако, данный эффект требует более внимательного анализа с учетом сильного искажения магнитного поля вблизи магнитопаузы.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным низкоорбитальных спутников F6 и F7 исследовано давление ионов в областях ионосферных проекций плазменной мантии, полярного каспа, низкоширотного входного слоя (LLBL) и в области структурированных высыпаний аврорального овала (AOP). В работе использованы данные спутников за полный 1986 г, который был годом спокойного Солнца в самом начале 22 цикла солнечной активности. Проведено сопоставление уровней давления высыпавшихся частиц в различных областях высыпаний и исследовано влияние  $B_z$ -компоненты ММП и динамического давления солнечного ветра на уровень давления плазмы. Обнаружено, что во всех исследуемых областях высыпаний уровень давления ионов не зависит ни от полярности, ни от величины  $B_z$  компоненты ММП. Давление в области мантии изменяется в диапазоне от 0.02 до 0.06 нПа и не зависит от величины динамического давления солнечного ветра. Средний уровень давления  $\langle P_m \rangle = 0.03 \pm 0.01$  нПа. В области каспа при  $B_z$  ММП  $> 0$  давление ионов не зависит от динамического давления солнечного ветра, в то время как при  $B_z$  ММП  $< 0$  наблюдается значительное увеличение давления с ростом  $P_{sw}$ . Средний уровень давления  $\langle P_c \rangle = 1.0 \pm 0.3$  нПа, что почти на два порядка выше, чем в мантии. Давление в области высыпаний LLBL существенно увеличивается с ростом динамического давления возможно вследствие усиления эффективности механизмов проникновения плазмы переходного слоя на геомагнитные силовые линии. Средний уровень давления в LLBL  $\langle P_L \rangle = 0.27 \pm 0.07$  нПа. Распределение давления в LLBL по MLT демонстрирует ярко выраженное локальное увеличение давления в полуденном секторе ( $\sim 11-14$  MLT), величина которого растет с увеличением  $P_{sw}$ . Давление в области высыпаний аврорального овала (AOP) также увеличивается с ростом  $P_{sw}$  и составляет в среднем  $\sim 0.5$  от уровня давления в высыпаниях LLBL. В области AOP давление по MLT распределено достаточно равномерно, в результате чего в полуденном секторе появляется значительная разность давлений ( $\Delta P = P_L - P_A$ ) между областями LLBL и AOP.

Данные спутников DMSP взяты на (<http://sd-www.jhuapl.edu>), параметры ММП, плазмы солнечного ветра и индексы магнитной активности – на (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>) и (<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Антонова Е.Е., Воробьев В.Г., Кирпичев И.П., Ягодкина О.И. Сравнение распределения давления плазмы в экваториальной плоскости и на малых высотах в магнитоспокойных условиях // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 54. № 3. С. 300–303. 2014. <https://doi.org/10.7868/S001679401403002X>
- Арцимович Л.А., Сагдеев Р.З. Физика плазмы для физиков. М.: Атомиздат., 1979. 320 с.
- Воробьев В.Г., Ягодкина О.И. Влияние плотности солнечного ветра на характеристики авроральных высыпаний // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 46. № 1. С. 55–61. 2006.
- Воробьев В.Г., Ягодкина О.И., Антонова Е.Е. Ионное давление на границах авроральных высыпаний и его связь с динамическим давлением солнечного ветра // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 59. № 5. С. 582–593. 2019. <https://doi.org/10.1134/S0016794019050146>
- Знаткова С.С., Антонова Е.Е., Застенкер Г.Н., Кирпичев И.П. Баланс давлений на магнитопаузе вблизи подсолнечной точки по данным наблюдений спутников проекта THEMIS // Космич. исслед. Т. 49. № 1. С. 5–23. 2011.
- Кирпичев И.П., Антонова Е.Е. Распределение давления плазмы в экваториальной плоскости магнитосферы Земли на геоцентрических расстояниях от 6 до 10  $R_E$  по данным международного проекта THEMIS // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 51. № 4. С. 456–461. 2011.
- Кирпичев И.П., Ягодкина О.И., Воробьев В.Г., Антонова Е.Е. Положение проекций экваториальной и полярной кромок ночного аврорального овала в экваториальной плоскости магнитосферы // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 56. № 4. С. 437–444. 2016. <https://doi.org/10.7868/S0016794016040064>
- Пулинец М.С., Кирпичев И.П., Антонова Е.Е. Изменения параметров плазмы и магнитного поля при пересечении магнитопаузы во время максимума главной фазы магнитной бури 14 ноября 2012 г. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 56. № 6. С. 769–778. 2016. <https://doi.org/10.7868/S0016794016060134>
- Россоленко С.С., Антонова Е.Е., Ермолаев Ю.И., Веригин М.И., Кирпичев И.П., Бородкова Н.Л. Турбулентные флуктуации параметров плазмы и магнитного поля в магнитослое и формирование низкоширотного погранслоя: многоспутниковые наблюдения 2 марта 1996 г. // Космич. исслед. Т. 46. № 5. С. 387–397. 2008.
- Старков Г.В., Реженев Б.В., Воробьев В.Г., Фельдштейн Я.И., Громова Л.И. Структура авроральных вторжений в дневном секторе // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 42. № 2. С. 186–194. 2002.
- Antonova E.E., Ganushkina N.Y. Azimuthal hot plasma pressure gradients and dawn-dusk electric field formation // J. Atm. Sol-Terr. Phys. V. 59. P. 1343–1354. 1997. [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(96\)00169-1](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(96)00169-1)
- Antonova E.E., Kirpichev I.P., Vovchenko V.V., Stepanova M.V., Riazantsev M.O., Pulnits M.S., Ovchinnikov I.L., Znatkova S.S. Characteristics of plasma ring, surrounding the Earth at geocentric distances  $\sim 7-10R_E$ , and magnetospheric current systems // J. Atm. Sol-Terr. Phys. V. 99. P. 85–91. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2012.08.01>
- Antonova E.E., Kirpichev I.P., Stepanova M.V. Plasma pressure distribution in the surrounding the Earth plasma ring and its role in the magnetospheric dynamics. J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys. V. 115. P. 32–40. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2013.12.005>
- Antonova E.E., Stepanova M., Kirpichev I.P., Ovchinnikov I.L., Vorobjev V.G., Yagodkina O.I., Riazantseva M.O., Vovchenko V.V., Pulnits M.S., Znatkova S.S., Sotnikov N.V. Structure of magnetospheric current systems and mapping of high latitude magnetospheric regions to the ionosphere // J. Atm. Sol-Terr. Phys. V. 177. P. 103–114. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.10.013>
- Burch J.L. Rate of erosion of dayside magnetic flux based on a quantitative study of the dependence of polar cusp latitude on the interplanetary magnetic field // Radio Sci. V. 8. P. 955–961. 1973.
- Fairfield D.H. Average magnetic field configuration of the outer magnetosphere // J. Geophys. Res. V. 73. P. 7329–7338. 1968.
- Goertz C.K., Baumjohann W. On the thermodynamics of the plasma sheet // J. Geophys. Res. V. 96. № A12. P. 20991–20998. 1991. <https://doi.org/10.1029/91JA02128>
- Gosling J.T., Thomsen M.F., Bame J., Elphic R.C., Russel C.T. Observations of reconnection of interplanetary and lobe magnetic field lines at the high-latitude magnetopause // J. Geophys. Res. V. 96. № A8. P. 14097–14106. 1991. <https://doi.org/10.1029/91JA01139>
- Haerendel G., Paschmann G., Sckopke N., Rosenbauer H., Hedgecock P.C. The frontside boundary layer of the magnetosphere and problem of reconnection // J. Geophys. Res. V. 83. № A7. P. 3195–3216. 1978. <https://doi.org/10.1029/JA083Ia07P03195>
- Horwitz J.L., Akasofu S.I. The response of the dayside aurora to sharp northward and southward transition of the interplanetary magnetic field and to magnetospheric substorm // J. Geophys. Res. V. 82. № 19. P. 2723–2734. 1977. <https://doi.org/10.1029/JA082i019p02723>
- Lemaire J. Impulsive penetration of filamentary plasma elements into the magnetospheres of the Earth and Jupiter // Planet. Space Sci. V. 25. № 9. P. 877–890. 1977. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(77\)90042-3](https://doi.org/10.1016/0032-0633(77)90042-3)
- Newell P.T., Meng C.-I., Sibeck D.G., Lepping R. Some low-altitude cusp dependence on interplanetary magnetic field // J. Geophys. Res. V. 94. P. 8921–8927. 1989. <https://doi.org/10.1029/JA094iA07p08921>
- Newell P.T., Wing S., Meng C.-I., Sigillito V. The auroral oval position, structure, and intensity of precipitation from 1984 onward – An automated on-line data base // J. Geophys. Res. V. 96. № A4. P. 5877–5882. 1991a. <https://doi.org/10.1029/90JA02450>
- Newell P.T., Burke W.J., Meng C.-I., Sanchez E.R., Green-span M.E. Identification and observations of the plasma

- mantle at low altitude // *J. Geophys. Res.* V. 96. № A1. P. 35–45. 1991b.  
<https://doi.org/10.1029/90JA01760>
- *Newell P.T., Burke W.J., Sanchez E.R., Meng C.-I., Greenspan M.E., Clauer C.R.* The low-latitude boundary layer and the boundary plasma sheet at low altitude: prenoon precipitation regions and convection reversal boundaries // *J. Geophys. Res.* V. 96. № A.12. P. 21013–21023. 1991c.  
<https://doi.org/10.1029/91JA01818>
- *Newell P.T., Meng C.-I.* Ionospheric projections of magnetospheric regions under low and high solar wind pressure conditions // *J. Geophys. Res.* V. 99. № A1. P. 273–286. 1994.  
<https://doi.org/10.1029/93JA02273>
- *Panov E.V., Büchner J., Fränz M., Korth A., Savin S.P., Rème H., Fornaçon K.-H.* High-latitude Earth's magnetopause outside the cusp: Cluster observations // *J. Geophys. Res.* V. 113. A01220. 2008.  
<https://doi.org/10.1029/2006JA012123>
- *Rossolenko S.S., Antonova E.E., Yermolaev Yu.I., Verigin M.I., Kirpichev I.P., Borodkova N.L., Budnik E.Yu.* Magnetosheath turbulence and low latitude boundary layer (LLBL) formation // *Proc. XXX Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena”*. Apatity. P. 81–84. 2007
- *Roth M.* On impulsive penetration of solar wind plasmas into the geomagnetic field // *Planet. Space Sci.* V. 40. № 2–3. P. 193–201. 1992.  
[https://doi.org/10.1016/0032-0633\(92\)90057-U](https://doi.org/10.1016/0032-0633(92)90057-U)
- *Sandholt P.E., Egeland A., Deehr C.S., Sivjee G.G., Romick G.J.* Effect of interplanetary magnetic field and magnetospheric substorm variations on the dayside aurora // *Planet. Space Sci.* V. 31. № 11. P. 1345–1362. 1983.  
[https://doi.org/10.1061/0032-0633\(83\)90071-5](https://doi.org/10.1061/0032-0633(83)90071-5)
- *Stepanova M.V., Antonova E.E., Bosqued J.M., Kovrazhkin R.A., Aibel K.R.* Asymmetry of auroral electron precipitations and its relationship to the substorm expansion phase onset // *J. Geophys. Res.* V. 107. № A7. 2002.  
<https://doi.org/10.1029/2001JA003503>
- *Stepanova M., Antonova E.E., Bosqued J.-M.* Study of plasma pressure distribution in the inner magnetosphere using low-altitude satellites and its importance for the large-scale magnetospheric dynamics // *Adv. Space Res.* V. 38. № 8. P. 1631–1636. 2006.  
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2006.05.013>
- *Troshichev O.A.* Plasma pressure and field-aligned currents in the magnetosphere // *Adv. Space Res.* V. 33. P. 729–736. 2004.  
[https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(03\)00637-9](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(03)00637-9)
- *Tsyganenko N.A., Mukai T.* Tail plasma sheet models derived from Geotail particle data // *J. Geophys. Res.* V. 108. № A3. 1136. 2003.  
<https://doi.org/10.1029/2002JA009707>
- *Vorobjev V.G., Starkov G.V., FeIdstein Ya.I.* The auroral oval during the substorm development // *Planet. Space Sci.* V. 24. P. 055–965. 1976.
- *Vorobjev V.G., Yagodkina O.I., Katkalov Y.* Auroral Precipitation Model and its applications to ionospheric and magnetospheric studies // *J. Atm. S-Terr. Phys.* V. 102. P. 157–171. 2013.  
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2013.05.007>
- *Wing S., Newell P.T.* Center plasma sheet ion properties as inferred from ionospheric observations // *J. Geophys. Res.* V. 103. № A4. P. 6785–6800. 1998.  
<https://doi.org/10.1029/97JA02994>
- *Xing X., Lyons L. R., Angelopoulos V., Larson D., McFadden J., Carlson C., Runov A., Auster U.* Azimuthal plasma pressure gradient in quiet time plasma sheet // *J. Res. Lett.* V. 36. L14105. 2009.  
<https://doi.org/10.1029/2009GL038881>