

УДК 550.338.1

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ВЫСЫПАНИЙ ДНЕВНОГО ПОЛЯРНОГО КАСПА ПРИ СЕВЕРНОМ МЕЖПЛАНЕТНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

© 2022 г. В. Г. Воробьев¹, *, О. И. Ягодкина¹

¹Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
“Полярный геофизический институт”, Апатиты, Россия

*E-mail: vorobjev@pgia.ru

Поступила в редакцию 29.07.2022 г.

После доработки 15.08.2022 г.

Принята к публикации 22.08.2022 г.

Рассмотрены уникальные траектории спутников DMSP относительно дневного полярного каспа, позволяющие на временных интервалах 2–3 мин определить характеристики каспических высыпаний в различных секторах местного геомагнитного времени. Показано, что широтные размеры каспа зависят от местного геомагнитного времени и существенно различаются в предполуденном и послеполуденном секторах. В каспе может наблюдаться как крупномасштабный тренд изменения потоков энергии ионов с изменением местного геомагнитного времени, так и более мелкомасштабные вариации потоков энергии с долготными размерами ~100–150 км. Широтные размеры каспа определяются, главным образом, динамическим давлением солнечного ветра (P_{sw}). При уровне $P_{sw} = 17–19$ нПа ширина каспа составляет $2.0^{\circ}–2.5^{\circ}$ широты, в то время как при $P_{sw} \sim 1.0$ нПа – только $\sim 0.3^{\circ}$.

DOI: 10.31857/S0367676522120304

ВВЕДЕНИЕ

Дневные полярные каспы (по одному в каждом полушарии) представляют собой воронкообразную структуру в геомагнитном поле, через которую вдоль силовых линий возможно непосредственное проникновение плазмы солнечного ветра на высоты ионосферы. Исследование морфологии каспа, динамики и структуры каспических высыпаний является важным звеном в изучении процессов взаимодействия межпланетного магнитного поля (ММП) и плазмы солнечного ветра с магнитосферой Земли и механизмов проникновения в магнитосферу солнечной плазмы.

По сопоставлению спутниковых наблюдений на различных высотах получены характеристики частиц в различных областях высыпаний дневного сектора и определены критерии, позволяющие по наблюдениям высыпающихся частиц на низковысотных спутниках идентифицировать высыпания в каспе и в соседних с ним областях [1]. Создана автоматизированная система определения структуры высыпаний дневного сектора по данным низкоорбитальных спутников серии DMSP [2]. Быстрые орбиты и наличие нескольких спутников способствовали частым пересечениям областей дневных высыпаний. Все это уже к началу 90-х гг. прошлого столетия позволило накопить достаточный наблюдательный материал для определения морфологических характеристик и динамики полярного каспа.

Статистические исследования (см. например, [1–3]) способствовали формированию некой усредненной модели каспа. Показано, что на высотах ионосферы касп представляет собой область с размерами $\sim 1^{\circ}$ по широте и ~ 2.5 ч местного геомагнитного времени (MLT) по долготе. Касп примерно симметричен относительно своей центральной части, как правило, расположенной в районе полуденного меридиана, и смещается в северном полушарии на ~ 1 ч MLT в предполуденную (послеполуденную) сторону при отрицательных (положительных) значениях V_z -компоненты ММП. Пик потоков энергии внутри каспа, в среднем, располагается ближе к его экваториальному краю, чем к приполюсному. Среднегодовая композиция спектрограмм высыпаний указывает на то, что свойства каспа сравнительно мало меняются с MLT. Такая среднестатистическая картина каспа поддержана схемами распределения высыпаний дневного сектора (см., например, [4]) и цитируется в целом ряде обзоров и научных исследований.

На больших и средних высотах свойства каспа наиболее детально исследовались по наблюдениям спутника Polar [5] и в рамках проекта Cluster [6]. Статистика наблюдений на этих спутниках, в целом, согласуется с результатами DMSP, добавляя некоторую детализацию. Так, например, в [5] исследованы 459 пересечений спутником Polar области каспа и показано, что в полдень среднее

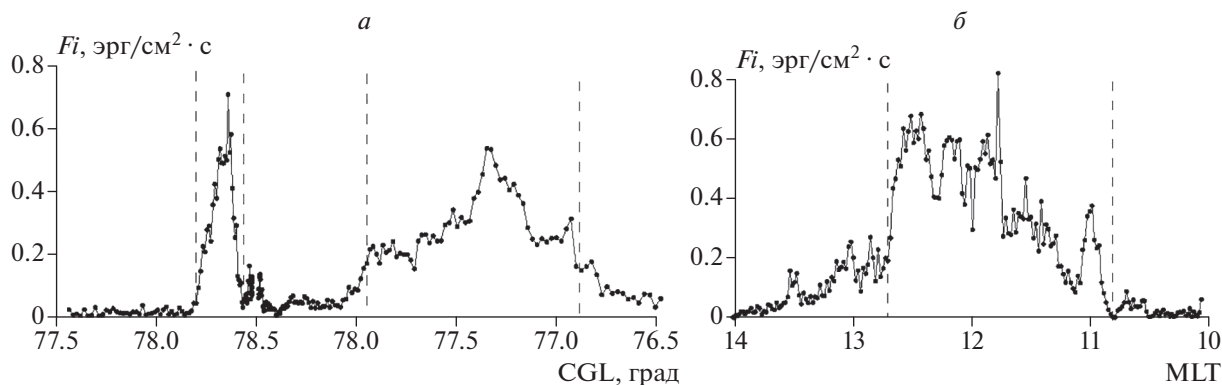


Рис. 1. Наблюдения каспа спутником F13. Вариации потоков энергии высыпающихся ионов (F_i , эрг \cdot см $^{-2}$ \cdot с $^{-1}$): 18 марта 2002 г. в интервале 10:06–10:10 UT (а) и 19 марта 2002 г. в интервале 11:35–11:38 UT (б). Границы каспа отмечены вертикальными штриховыми линиями.

положение центра каспа $\sim 80.3^\circ$ инвариантной широты и смещается к экватору на $\sim 1.5^\circ$ широты к 08:00 MLT и 16:00 MLT. Структура и динамика каспа определяются параметрами ММП и уровнем динамического давления солнечного ветра. Наблюдения на разных высотах в каспе указывают на его сильную изменчивость. В работе [6] (см. также ссылки там) отмечается быстрая реакция каспа на изменения ММП: в течение всего нескольких минут изменяется скорость конвекции в каспе и его конфигурация.

В этой связи разумно предположить, что рассмотренные выше среднестатистические характеристики каспа в естественных условиях наблюдаются крайне редко. Особенно это может касаться долготных характеристик каспа. Спутники при каждой регистрации каспа позволяют получить информацию только в очень ограниченной по MLT области, в то время как параметры каспа в других секторах MLT в этот период остаются неизвестными.

Целью настоящей работы является показать крайне редкие, уникальные конфигурации траектории спутников DMSP относительно каспа, позволяющие на коротких временных интервалах определить характеристики каспальных высыпаний в различных секторах MLT. В работе исследованы широтные размеры каспа в зависимости от параметров межпланетной среды и в отдельных, специально отобранных пролетах проведен анализ структуры высыпаний каспа при экстремальных значениях динамического давления солнечного ветра.

ДОЛГОТНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСЫПАНИЙ

Все рассмотренные в настоящей работе индивидуальные пролеты спутников DMSP были зарегистрированы в северном полушарии при положительных значениях B_z компоненты ММП и

отрицательных значениях B_y компоненты. Орбиты спутников солнечно ориентированы, поэтому MLT и угол пересечения спутником дневного каспа сильно зависят от угла наклона геомагнитного диполя к плоскости эклиптики и от широтного положения самой области каспа. На рис. 1 представлены два уникальных пролета спутника F13, конфигурация орбит которого относительно каспа позволяет на коротких временных интервалах проследить характеристики высыпаний в различных секторах MLT. Положение экваториальной и приполюсной границ каспа определялось по критериям [1] и отмечены на рисунках вертикальными штриховыми линиями. На рис. 1а показаны вариации потока энергии высыпающихся ионов (F_i , эрг \cdot см $^{-2}$ \cdot с $^{-1}$) в интервале 10:06–10:10 UT 18 марта 2002 г. По горизонтальной оси отложена исправленная геомагнитная широта (CGL) траектории спутника на высоте 110 км. Сначала, по мере увеличения широты спутник пересек касп в послеполуденном секторе, экваториальную границу на $\sim 78.20^\circ$ CGL и ~ 13.1 MLT и приполюсную на $\sim 78.45^\circ$ CGL и ~ 12.6 MLT. Выше каспа по широте были зарегистрированы высыпания мантии. Затем с уменьшением широты спутник вновь пересекал область каспа, но уже в предполуденном секторе, приполюсную границу на $\sim 77.95^\circ$ CGL и ~ 11.2 MLT и экваториальную на $\sim 76.90^\circ$ CGL и ~ 10.40 MLT. В каспе поток энергии высыпающихся ионов максимален по сравнению с соседними областями высыпаний — мантией, полюсное каспа, и низкоширотным граничным слоем (LLBL) экваториальнее него. Положение максимумов F_i в каспе было зафиксировано на 12.8 MLT и 10.6 MLT с разницей по времени регистрации в ~ 2 мин. Поток энергии высыпающихся ионов в максимуме составляет ~ 0.6 эрг \cdot см $^{-2}$ \cdot с $^{-1}$ и был несколько больше в послеполуденном секторе, чем в предполуденном. Примерные широтные размеры каспа определялись по разности широт его приполюсной и экваториальной гра-

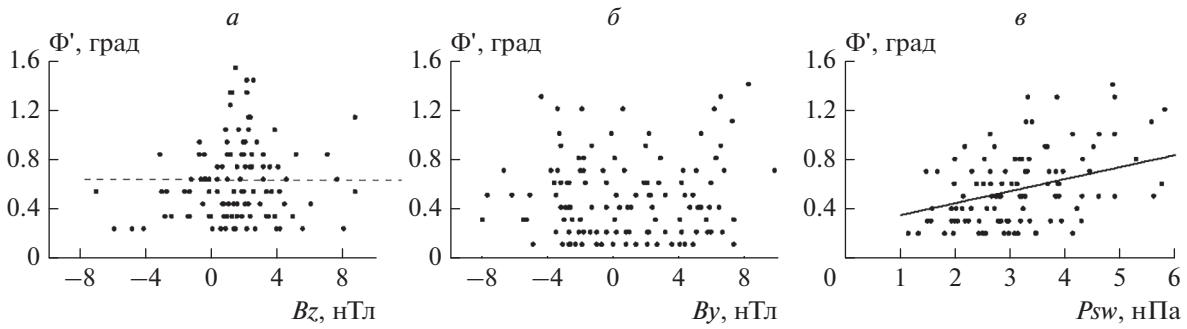


Рис. 2. Широтные размеры каспа ($\Delta\Phi'$) в градусах широты относительно Bz (а) и Vy (б) компонент ММП и динамического давления солнечного ветра (в).

ниц. В послеполуденном секторе ширина каспа составляла $\sim 0.25^\circ$, но касп значительно шире $\sim 1.0^\circ$ в предполуденные часы MLT. Узкий касп в послеполуденном секторе располагался в более высоких широтах, чем даже приполюсная граница каспа в предполуденные часы. Таким образом, центр каспа от предполуденных к послеполуденным часам смещается в более высокие широты под углом $\sim 10^\circ$ к геомагнитной параллели.

На рис. 1б показаны потоки энергии высыпавшихся ионов 19 марта 2002 г. в интервале 11:35–11:38 UT. В этом событии по горизонтальной оси показано положение спутника по MLT. Как и в предыдущем пролете, спутник начал регистрировать высыпания каспа в послеполуденном секторе и находился внутри каспа в течение ~ 1.5 мин в интервале долгот от 12.7 MLT до 10.8 MLT. Очень незначительные изменения широты спутника (менее 0.05°) на границах каспа дают основание полагать, что в этом пролете был зарегистрирован весь долготный интервал каспанных высыпаний. По крайней мере, как минимальный долготный интервал можно рассматривать размеры каспа ~ 2 ч MLT. Внутри каспа широта спутника менялась в пределах $80.90^\circ \pm 0.15^\circ$ CGL.

Как видно на рис. 1б, потоки энергии высыпавшихся ионов значительно изменялись в зависимости от MLT. Потоки максимальны в послеполуденном секторе ~ 0.65 эрг \cdot см $^{-2}$ \cdot с $^{-1}$ и быстро падают к предполуденным часам MLT. На примерно линейный тренд уменьшения Fi с уменьшением MLT накладываются крупномасштабные вариации потоков энергии с долготными размерами ~ 100 – 150 км. Геомагнитная активность в периоды регистрации каспа на рис. 1 была низкая ($AL > -200$ нТл), динамическое давление солнечного ветра $P_{sw} \sim 2.4$ нПа.

ШИРОТНЫЕ РАЗМЕРЫ КАСПА ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УРОВНЯХ P_{sw}

Широтные размеры каспа меняются в пределах от нескольких десятых градуса до нескольких

градусов широты. Спутниковые наблюдения на различных высотах указывают на некоторое увеличение ширины каспа с ростом динамического давления солнечного ветра (P_{sw}). На статистическом материале наблюдений спутников DMSP в [7] показана тенденция к увеличению ширины каспа при больших абсолютных значениях Bz и Vy компонент ММП, однако разброс данных очень значительный. Трудность заключается в том, что большим значениям компонент ММП, как правило, сопутствуют большие уровни P_{sw} . Разделить влияние различных параметров солнечного ветра на размеры каспа не представляется возможным из-за небогатой в такие периоды статистики. Так, по наблюдениям спутников Polar и Cluster [5, 6] было только отмечено, что касп несколько шире при положительной полярности Bz компоненты ММП, чем при отрицательной.

В этой связи мы провели дополнительное изучение ширины каспа в зависимости от параметров межпланетной среды. Для этой цели использована база данных за 1986 г., созданная в [8] на основе данных спутника F7 для исследования структуры дневных высыпаний. Были отобраны пролеты спутника с зарегистрированной классической последовательностью областей дневных высыпаний с увеличением широты: LLBL-касмантия. Регистрация соседних к каспу областей является гарантией того, что спутник пересекал касп полностью, от его экваториальной до приполюсной границ. Рассматривались только области, которые более 4 раз (более 4 с полетного времени) регистрировались спутником. Всего за годовой период наблюдений было обнаружено 142 пересечения каспа, для которых были в наличии данные по плазме солнечного ветра и ММП.

На рис. 2а–2в показаны широтные размеры каспа ($\Delta\Phi'$) относительно Bz и Vy компонент ММП и P_{sw} соответственно. Рисунки 2а и 2б демонстрируют отсутствие в нашем наборе данных связи между шириной каспа и компонентами ММП. Расположение точек от Bz ММП (рис. 2а) скорее напоминает нормальное распределение ши-

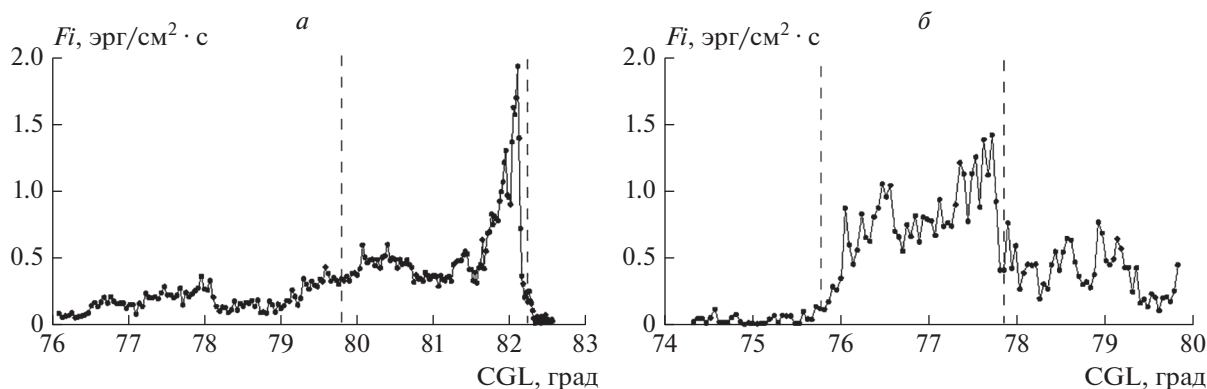


Рис. 3. Структура каспennых высыпаний при экстремально высоких значениях динамического давления солнечного ветра 17.5 (а) и 19.0 нПа (б). Поток энергии высыпающихся ионов по наблюдениям спутников F14 в 14:23 UT (а) и F15 в 16:16 UT (б) 18 марта 2002 г.

рины каспа относительного среднего $Bz = -0.5$ нТл при средней/медианной ширине каспа $\langle \Delta\Phi' \rangle = 0.6^\circ$. Отсутствует какая-либо зависимость ширины каспа от знака и величины Bu компоненты ММП (рис. 2б). Однако рис. 2в при значительном разбросе данных ясно демонстрирует тенденцию к росту $\Delta\Phi'$ с увеличением P_{sw} . Сплошная линия на рисунке соответствует уравнению линейной регрессии $\Delta\Phi' = 0.25 + 0.10 P_{sw}$, коэффициент корреляции $r = 0.52$. В целом, рис. 2 дает основание полагать, что на ширину каспа наиболее эффективно влияет динамическое давление солнечного ветра, а не компоненты ММП, особенно при его положительной полярности, когда положение границ каспа фактически не меняется в зависимости от величины Bz компоненты.

Уровень динамического давления солнечного ветра, в среднем, составляет 2–3 нПа, а интервал наиболее вероятных изменений $P_{sw} \sim 1$ –6 нПа. Анализ характеристик высыпаний полярного каспа при экстремальных значениях P_{sw} , выходящих за рамки этого интервала, возможен только в отдельных, специально выбранных для этих целей спутниковых пролетах. На рис. 3а и 3б показана структура каспennых высыпаний при экстремально высоких значениях динамического давления 17.5 и 19.0 нПа соответственно. По оси X на рисунке отложена исправленная геомагнитная широта. Как и на рис. 1, положение границ каспа отмечено вертикальными штриховыми линиями. На рис. 3а показана регистрация каспа спутником F14 18 марта 2002 г. в 14:23 UT. Ширина каспа в этом пролете, зарегистрированная на долготе 11.5 MLT, составляла $\sim 2.4^\circ$ широты. Поток энергии высыпающихся ионов демонстрирует ярко выраженный максимум на приполюсной границе каспа, менее ярко выраженное увеличение Fi наблюдалось около его экваториального края. На рис. 3б представлены данные по пересечению каспа спутником F15 в этот же день, но в 16:16 UT.

Ширина каспа в этом пролете составляла 2.1° на долготе ~ 11.0 MLT. Поток высыпающихся ионов вновь максимальны на приполюсной границе каспа, но демонстрируют и второй максимум меньшей амплитуды в его экваториальной части.

На рис. 4 представлены наблюдения каспа при экстремально низких значениях P_{sw} . На рис. 4а показана регистрация каспа спутником F18 31 мая 2013 г. около 13:44 UT на меридиане 11.7 MLT. При уровне динамического давления солнечного ветра $P_{sw} = 0.87$ нПа широтные размеры каспа очень незначительные и составляют 0.3° широты. Поток энергии ионов в каспе выше, чем в окружающих его областях высыпаний, но даже в максимуме всего $0.1 \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Сравним с рис. 1а: здесь при $P_{sw} = 2.4$ нПа потоки энергии ионов достигали величин $\sim 0.6 \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

При уровнях $P_{sw} < 0.5$ нПа нам не удалось обнаружить регистраций дневного полярного каспа. Это может быть по двум причинам. Во-первых, долготные размеры каспа в такие периоды могут быть очень незначительными, что существенно понижает вероятность попадания спутников в область каспennых высыпаний. Во-вторых, очень низкие P_{sw} соответствуют очень низким потокам энергии солнечного ветра. В этом случае критерии определения каспа, выведенные в [1] для средне нормальных условий в солнечном ветре, могут быть сильно завышены, особенно по уровню потоков энергии ионных высыпаний. Крайне редко, но иногда, в околополуденном секторе наблюдаются небольшие области высыпаний, подобные высыпаниям каспа, но с потоками энергии ионов ниже уровня, определенного по критериям [1]. Один из таких примеров показан на рис. 4б при уровне динамического давления солнечного ветра 0.27 нПа, компоненты ММП: $Bz = 1.5$ нТл, $Bu = -1.3$ нТл. По горизонтальной оси, как и на рис. 1б, здесь отложено MLT траектории спутника. Область высыпаний, по-

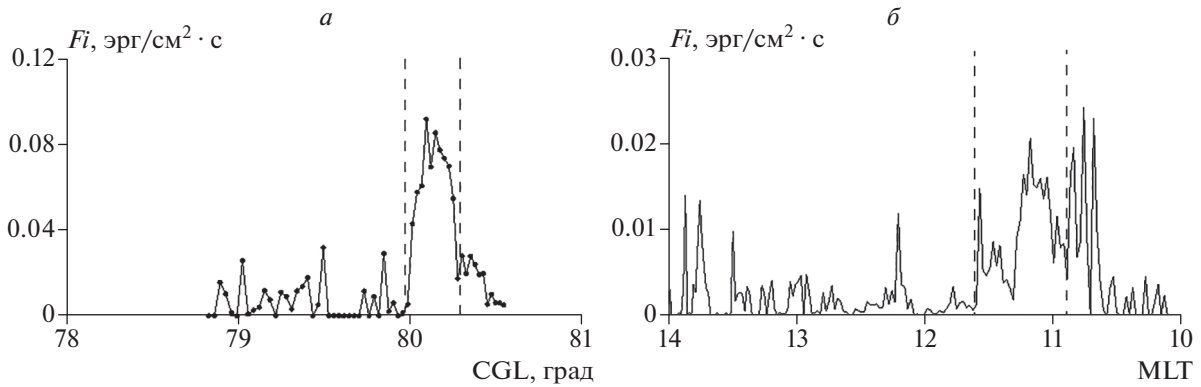


Рис. 4. Потоки энергии высыпающих ионов при экстремально низких значениях P_{sw} : наблюдения спутника F18 31 мая 2013 г. в интервале 13:43 UT–13:45 UT (а) и – 30 мая 2013 г. в интервале 11:25–11:28 UT (б).

добная высыпаниям каспа, зарегистрированная 30 мая 2013 г. спутником F16 в интервале 11:25–11:28 UT, выделена на рисунке вертикальными штриховыми линиями. В этой области средние энергии электронов и ионов и потоки энергии электронов соответствуют критериям [1], но потоки энергии ионов ниже стандартно регистрируемых в каспе. Размер такой каспообразной области по долготе составляют ~ 0.7 ч в интервале 10.9–11.6 MLT, а поток энергии высыпающих ионов в максимуме ~ 0.02 эрг \cdot см $^{-2}$ \cdot с $^{-1}$, что почти на порядок меньше, чем в событии на рис. 4а.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данные спутников серии DMSP использованы для исследования структуры ионных высыпаний дневного полярного каспа при северной ориентации B_z компоненты ММП. Рассмотрены уникальные конфигурации траектории спутников относительно каспа, позволяющие на коротких временных интервалах определить характеристики каспальных высыпаний в различных долготных секторах. Показано, что широтные размеры каспа зависят от MLT и существенно различаются в предполуденном и послеполуденном секторах. Обнаружено, что узкий касп в послеполуденном секторе располагался в более высоких широтах, чем даже приполюсная граница каспа в предполуденные часы. Это указывает на смещение центра каспа к полюсу от предполуденных к послеполуденным часам под углом $\sim 10^\circ$ к геомагнитной параллели.

В каспе может наблюдаться как крупномасштабный тренд изменения потоков энергии ионов с изменением MLT, так и более мелкомасштабные вариации потоков энергии с долготными размерами ~ 100 – 150 км. Последние, по всей вероятности, связаны с развитием неустойчивостей в области каспа.

Широтные размеры каспа определяются, главным образом, динамическим давлением солнечного ветра. При уровне $P_{sw} = 17$ – 19 нПа ширина каспа составляет 2.0° – 2.5° широты, в то время как при P_{sw} около 1.0 нПа – только $\sim 0.3^\circ$. Большим уровням P_{sw} в рассмотренных на рис. 3 событиях сопутствовали большие положительные значения B_z компоненты. Это создает определенные трудности в разделении влияния разных параметров на ширину каспа. Однако статистические исследования и данные по широтным размерам каспа при экстремальных уровнях P_{sw} позволяют нам сделать вывод о доминирующем влиянии динамического давления солнечного ветра на ширину каспа при северной ориентации ММП.

При больших уровнях P_{sw} поток энергии высыпающих ионов демонстрирует ярко выраженный максимум на приполюсной границе каспа. Второе, менее ярко выраженное увеличение потоков энергии наблюдалось около его экваториального края.

Возможное существование двойного максимума в потоках энергии высыпающих ионов при южной ориентации ММП было показано в [7]. В этой же работе представлена модель, основанная на теории магнитного пересоединения, предсказывающая появление двойного максимума при небольшой южной B_z компоненте и сильной азимутальной B_y компоненте ММП. Моделирование каспа при северном ММП, проведенное в [9], не показывает четко выраженного двойного максимума в ионной популяции. Возможно, наличие двойного максимума при $B_z > 0$ является атрибутом экстремально больших значений P_{sw} . В такие периоды возможно наличие двух источников ионов каспа из высокоширотного и низкоширотного переходного слоя.

При уровнях $P_{sw} < 0.5$ нПа по данным спутников DMSP не удалось обнаружить регистраций дневного полярного каспа. Предполагается, что в

периоды экстремально низких значений динамического давления солнечного ветра критерии определения каспа, выведенные в [1] для средне нормальных условий в солнечном ветре, могут быть сильно завышены.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Newell P.T., Meng C.-I.* // J. Geophys. Res. 1988. V. 93. No. A12. Art. No. 14556.
2. *Newell P.T., Wing S., Meng C.-I., Sigillito V.* // J. Geophys. Res. 1991. V. 96. No. A4. P. 5877.
3. *Newell P.T., Meng C.-I., Sibeck D.G., Lepping R.* // J. Geophys. Res. 1989. V. 94. P. 8921.
4. *Newell P.T., Meng C.-I.* // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. No. A1. P. 273.
5. *Zhou X.W., Russell C.T., Le G., Fuselier S.A., Scudder J.D.* // J. Geophys. Res. 2000. V. 105. No. A1. P. 245.
6. *Pitout F., Bogdanova Y.V.* // J. Geophys. Res. 2021. V. 126. No. 9. Art. No. e2021JA029582.
7. *Wing S., Newell P.T., Rouhoniemi J.M.* // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. No. A11. Art. No. 25571.
8. *Старков Г.В., Реженев Б.В., Воробьев В.Г. и др.* // Геомагн. и аэронаом. 2002. Т. 42. № 2. С. 186.
Starkov G.V., Rezhenov B.V., Vorobjev V.G. et al. // Geomagn. Aeron. 2002. V. 42. No. 2. P. 176.
9. *Esmaili A., Kalaee M.J.* // Astrophys. Space Sci. 2017. V. 362. P. 124.

Features of the daytime polar cusp precipitation structure during the northward interplanetary magnetic field

V. G. Vorobjev^{a, *}, O. I. Yagodkina^a

^a*Polar Geophysical Institute, Apatity, 184209 Russia*

^{*}*e-mail: vorobjev@pgia.ru*

The unique trajectories of DMSP spacecraft relative to the daytime polar cusp are considered, which make it possible to determine the features of the cusp precipitation in different longitude sectors for short 2–3 min time intervals. It is shown that the latitudinal widths of the cusp depend on the MLT and differ significantly in the pre-noon and afternoon sectors. A large-scale trend in ion energy fluxes with a change in MLT as well as smaller-scale variations in energy fluxes with longitude dimensions of ~100–150 km can be observed in the cusp. The latitudinal widths of the cusp are determined mainly by the solar wind dynamic pressure (P_{sw}). At $P_{sw} = 17–19$ nPa, the width of the cusp was $2.0^{\circ}–2.5^{\circ}$ latitude, while at $P_{sw} \sim 1.0$ nPa it was only $\sim 0.3^{\circ}$.