

## ШИРОТНАЯ СТРУКТУРА ВЫСЫПАНИЙ В ОБЛАСТИ ДНЕВНОГО ПОЛЯРНОГО КАСПА

© 2023 г. В. Г. Воробьев<sup>1, \*</sup>, О. И. Ягодкина<sup>1, \*\*</sup>,  
Е. Е. Антонова<sup>2, 3, \*\*\*</sup>, И. П. Кирпичев<sup>3, \*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Полярный геофизический институт (ПГИ), 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), Москва, Россия

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

\*e-mail: vorobjev@pgia.ru

\*\*e-mail: oksana41@mail.ru

\*\*\*e-mail: elizaveta.antonova@gmail.com

\*\*\*\*e-mail: ikir@iki.rssi.ru

Поступила в редакцию 06.04.2023 г.

После доработки 06.07.2023 г.

Принята к публикации 03.08.2023 г.

Проведен анализ результатов наблюдений низколетящих спутников, пересекающих дневной сектор авроральной зоны, и высокопогодных спутников в экваториальной плоскости магнитосферы с целью выделения основных процессов, приводящих к формированию дневных полярных каспов. Данные спутника DMSP F7 использованы для анализа широтных характеристик ионных высыпаний в области каспа и изучения широтного профиля ионного давления в каспе в зависимости от параметров ММП. Обнаружено существенное различие в идентификации границ каспа, осуществляемой автоматизированной системой обработки данных и прямым анализом спутниковых наблюдений. Показано, что при небольших отрицательных значениях  $B_z$ -компоненты ММП ( $\langle B_z \rangle = -3.0$  нТл) характерной чертой каспа является широтный профиль ионного давления ( $P_i$ ) шириной  $\sim 1^\circ$  широты с двумя максимумами, один из которых находится в экваториальной, а другой в приполюсной части каспа. При больших отрицательных значениях  $B_z$  ( $-6, -8$  нТл) приполюсный максимум в широтном профиле  $P_i$  исчезает, остается только экваториальный максимум, уровень  $P_i$  в максимуме увеличивается, а ширина каспа уменьшается до  $\sim 0.7^\circ$ . При  $B_z$  ММП  $> 0$  наиболее характерным является профиль  $P_i$  с максимумом ионного давления в приполюсной части каспа. Касп при  $B_z > 0$  располагается в более высоких широтах, чем при  $B_z < 0$ , его средние широтные размеры увеличиваются до  $\sim 1.4^\circ$  широты. В предполуденном секторе MLT наиболее характерным для периодов с большой отрицательной  $V_u$ -компонентой ММП ( $\langle V_u \rangle = -6.3$  нТл,  $\langle B_z \rangle = -1.7$  нТл) является касп шириной  $\sim 1.4^\circ$  широты с плоской вершиной в широтном профиле  $P_i$ . Сравнение наблюдаемых на низких высотах распределений давления с данными высокопогодных спутников подтвердило возможность описания формирования каспа как диамагнитной полости и использования наблюдений в каспе для определения давления ионов в магнитослое.

DOI: 10.31857/S0016794023600448, EDN: PWQINH

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Полярные каспы (по одному в каждом полушарии) возникают в результате обтекания геомагнитного диполя плазмой солнечного ветра и искажений дипольного поля текущими в магнитосфере токами. Каждый полярный касп представляет собой диамагнитную воронкообразную структуру [Pitout and Vogdanova, 2021]. Плазма магнитослоя в областях каспов проникает до ионосферных высот и регистрируется на низколетящих авроральных спутниках. С ростом дина-

мического давления солнечного ветра ( $P_{sw}$ ) увеличиваются долготные и широтные размеры каспа, а также потоки энергии частиц магнитослоя, высыпаящиеся в области полярного каспа [Newell and Meng, 1994; Воробьев и Ягодкина, 2022].

На высотах ионосферы касп, как правило, наблюдается на исправленных геомагнитных широтах от  $74^\circ$  до  $78^\circ$  CGL в зависимости, главным образом, от угла наклона геомагнитного диполя, от уровня геомагнитной активности и от величин  $B_z$ - и  $V_u$ -компонент межпланетного магнитного

поля (ММП). Крупномасштабные характеристики каспа были получены еще несколько десятилетий тому назад по наблюдениям высыпающихся частиц на низковысотных спутниках с полярной орбитой серии DMSP. Согласно статистическим исследованиям [Newell and Meng, 1988; Newell et al., 1989, 1991 и др.], касп на высотах спутников DMSP представляет собой область с размерами  $\sim 1^\circ$  по широте и  $\sim 2.5$  ч MLT по долготе. Касп примерно симметричен относительно своей центральной части, как правило, расположенной в районе полуденного меридиана, и смещается в северном полушарии на  $\sim 1$  ч MLT в предполуденную (послеполуденную) сторону при отрицательных (положительных) значениях  $V_y$ -компоненты ММП. При очень высоком уровне динамического давления солнечного ветра ( $P_{sw} \sim 20$  нПа) ширина каспа может составлять  $2.0^\circ$ – $2.5^\circ$  широты [Воробьев и Ягодкина, 2022], а уже при  $P_{sw} \sim 6$  нПа средние долготные размеры каспа увеличиваются до 4.8 ч MLT [Newell and Meng, 1994].

Касп очень динамичен, его характеристики быстро меняются вслед за изменением параметров внешнего воздействия. Наблюдения спутников проекта CLUSTER на средних высотах в каспе указывают на очень быструю реакцию каспа на изменения ММП: течения в каспе начинают изменяться уже в интервале  $\sim 1$ – $2$  мин после изменения ММП [Pitout and Bogdanova, 2021]. Солнечный ветер обладает высоким уровнем турбулентных флуктуаций со сложными нелинейными связями флуктуирующих параметров. Поэтому выделение влияния каждого из параметров на характеристики высыпаний полярного каспа является крайне сложной задачей. Несмотря на многочисленные исследования, опубликованные в последние 2–3 десятилетия, влияние отдельных параметров плазмы солнечного ветра и ММП на структуру высыпаний полярного каспа и даже их крупномасштабные характеристики остаются до конца неисследованными. Так, в работе [Wing et al., 2001] на основе анализа наблюдений спутников DMSP за 1985–1995 гг. сделан вывод, что широтные размеры каспа увеличиваются с ростом абсолютных значений как  $B_z$ -, так и  $V_y$ -компонент ММП. Однако, с одной стороны, значительные по величине компоненты ММП часто сопровождаются большими уровнями  $P_{sw}$ . С другой стороны, разброс данных в этом исследовании настолько велик, а коэффициенты корреляции настолько низкие, что можно говорить только о некоторой тенденции к увеличению широтных размеров каспа. Получено, что при  $|B_z|$  и  $|V_y| < 5$  нТл широтные размеры каспа составляют только  $\sim 0.5^\circ$ – $0.7^\circ$  широты и увеличиваются в среднем до  $\sim 1^\circ$  при  $|B_z|$  или  $|V_y| > 5$  нТл. В противовес данному утверждению, авторы обзорной работы [Pitout and Bogdanova, 2021] указывают на

то, что при больших величинах отрицательной  $B_z$ -компоненты ММП касп может быть очень узким по широте. Так, в [Bogdanova et al., 2007] проанализированы результаты регистрации каспа спутниками CLUSTER. При экстремально больших значениях южной компоненты ММП был зарегистрирован касп шириной менее  $1^\circ$ , в то время как при средне нормальных условиях ширина каспа на высоте спутников CLUSTER составляет более  $2^\circ$ . Отметим, что МГД-моделирование, проведенное в [Siscoe et al., 2007], показывает хорошее соответствие с результатами этих наблюдений.

Работы по моделированию формирования каспа основаны, главным образом, на анализе регулярных сравнительно быстрых течений плазмы и движений групп частиц в регулярных полях. Моделируется проникновение частиц магнитослоя внутрь магнитосферы и образование в районе дневной магнитопаузы таких структур, как низкоширотный граничный слой, касп и плазменная мантия [Onsager et al., 1993; Wing et al., 1996; Wing et al., 2001 и др.]. Так, например, в работе [Wing et al., 2001] представлена модель высыпания частиц на открытых силовых линиях с использованием эмпирической модели электрического поля, полученной статистически на основе многолетних радарных наблюдений на обсерватории Goose Bay. При небольших значениях южной компоненты ММП и при наличии сильной азимутальной компоненты модель описывала появление двойного каспа. В полуденном секторе один касп располагался в более низких, а другой в более высоких широтах. Высокоширотный касп появлялся в области сильной азимутальной и направленной к полюсу конвекции, вследствие которой спутник с полярной орбитой должен регистрировать дисперсию энергии высыпающихся частиц по широте. Более низкоширотный касп располагался в области слабой азимутальной конвекции, поэтому рассматривался как бездисперсионный. В работе [Wing et al., 2001] представлены и отдельные пролеты спутников DMSP, подтверждающие, с точки зрения авторов, предсказание модели. Случай регистрации двойного каспа по наблюдениям спутников CLUSTER обсуждается и в работе [Escoubet et al., 2008]. Статистическое исследование морфологии каспа по наблюдениям спутников CLUSTER проведено в [Pitout et al., 2009]. Как указывают авторы этой работы, из 261 случая наблюдения каспа за период 2001–2004 гг. только 12 можно отнести к регистрации двойного каспа при относительно стабильном ММП. В 10 из этих событий двойной касп наблюдался при северной ориентации  $B_z$  ММП. Наблюдение двух источников каспа, одного на более низких, а другого на более высоких широтах, описано в [Fuselier et al., 2000] по наблюдениям спутника Polar при северном ММП и

высоком уровне динамического давления солнечного ветра ( $P_{sw}$ ). Признаки двух максимумов в ионных высыпаниях каспа при северном ММП и больших значениях  $P_{sw}$  обнаружены и в [Воробьев и Ягодкина, 2022] по данным спутников DMSP. Между тем, МГД-моделирование каспа при северном ММП, проведенное в [Esmacili and Kalaei, 2017], не показывает четко выраженного двойного максимума в ионной популяции, а возможность быстрых изменений локализации и крупномасштабных характеристик каспа в условиях резких изменений параметров солнечного ветра и ММП делает вероятным предположение о вкладе временного эффекта.

Динамика распределения высыпаний на авроральных широтах, регистрируемая на низколетящих спутниках, при моделировании определяется динамикой магнитосферного магнитного поля и распределением крупномасштабных электрических полей (картиной магнитосферной конвекции). Наблюдаемые закономерности обычно описываются с привлечением моделей закрытой и открытой магнитосферы и представлением о доминирующей роли процессов “пересоединения” (см., например, [Reiff et al., 1977; Sonnerup et al., 1981] и многочисленные более поздние работы). Однако, такие представления сталкиваются с определенными трудностями в областях, где скорости движения плазмы много меньше звуковой и альвеновской и выполняется условие магнитостатического равновесия [Antonova and Stanova, 2021; Antonova et al., 2023]. Магнитопауза изначально определялась как токовый слой, поперек которого осуществляется баланс давлений плазмы и магнитного поля магнитослоя и магнитосферы. Такой слой не просто выделить в области внешней части каспа, где магнитное поле мало и постоянно наблюдается высокий уровень турбулентных флуктуаций. Однако, в работе [Panov et al., 2008] удалось продемонстрировать существование в среднем баланса давлений между плазмой магнитослоя и каспа, используя данные наблюдений проекта CLUSTER. Такой баланс означает возможность использовать результаты усредненных по флуктуациям измерений низколетящих спутников, пересекающих область высыпаний каспа, для определения полного давления в магнитослое перед каспом, так как в условиях магнитостатического равновесия давление плазмы постоянно вдоль магнитной силовой линии. Величина давления плазмы в каспе определяет величину депрессии магнитного поля в области каспа, а, следовательно, и искажение магнитного поля. Однако, несмотря на то, что анализ давлений на авроральных спутниках и в экваториальной плоскости позволил прояснить проблему проецирования аврорального овала на экваториальную плоскость магнитосферы методом морфологического проецирования [Антонова и др.,

2014; Antonova et al., 2015, 2018], исследования распределения давления при пересечении авроральными спутниками области каспа только начались [Воробьев и др., 2020]. Были получены усредненные значения давления и определены их зависимости от динамического давления солнечного ветра и  $B_z$ -компоненты ММП. Проведение таких исследований может послужить основой для создания альтернативных моделей формирования каспов, основанных на анализе баланса давлений. Такие исследования, прежде всего, требуют проверки полученных ранее экспериментальных закономерностей и анализа распределения давления, получаемого по данным низколетящих спутников в области высыпаний каспа.

Целью настоящей работы является определение морфологических характеристик ионных высыпаний в области дневного полярного каспа и ионного давления в каспе, изучение особенностей широтного распределения потоков энергии высыпающихся ионов и их связи с  $B_z$ - и  $B_y$ -компонентами ММП. Особое внимание в работе уделено определению широтного положения экваториальной и приполюсной границ каспа и определению состояния ММП в периоды их регистрации. Результаты анализа распределения давления на низковысотных спутниках сравниваются с усредненным распределением давления в магнитослое вблизи экваториальной плоскости.

## 2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

В работе использованы данные спутника DMSP F7 за полный 1986 г. Это был год спокойного Солнца в самом начале 22 цикла солнечной активности. Спутник имел почти круговую полярную орбиту с высотой ~835 км и периодом обращения ~101 мин. Каждую секунду спутник регистрировал спектр высыпающихся частиц в диапазоне энергий от 32 эВ до 30 кэВ в 19-и каналах, распределенных по энергиям в логарифмической последовательности. За 1 секунду спутник перемещается на расстояние ~7.5 км, что с учетом отклонения его траектории от геомагнитного меридиана в среднем соответствует ~0.05° CGL. Необходимо отметить, что орбиты спутника F7 обеспечивали оптимальные возможности наблюдений высыпаний каспа, что было, как правило, затруднено при последующей реализации программы DMSP.

Для отбора пролетов спутника F7, при которых был зарегистрирован дневной полярный касп, использовались данные автоматизированной системы обработки (АСО), принцип работы которой опубликован в [Newell et al., 1991]. Положение экваториальной и приполюсной границ каспа были взяты как из таблиц АСО, так и были получены самими авторами из анализа оригинальных данных спутника. Данные спутника F7 и таблицы АСО представлены на страницах (<http://>

civspace.jhuapl.edu). Исправленные геомагнитные координаты спутника ( $\Phi'$  и MLT) в проекции вдоль силовых линий на высоту 110 км определялись по модели AACGM [Baker and Wing, 1989]. Данные в периоды магнитных бурь ( $Dst < -15$  нТл) не рассматривались.

Давление, создаваемое потоками высыпаящихся ионов, значительно превосходит давление электронов, которое составляет менее 15% общего давления плазмы. Методика определения ионного давления по измерениям спутников DMSP была опубликована в [Wing and Newell, 1998]. В настоящей работе использован модифицированный вариант этой методики, предложенный в работе [Stepanova et al., 2006]. Давление ионов рассчитывается в предположении максвелловского распределения частиц по энергиям, т.е. в данном исследовании не учитывался вклад энергичных частиц в полное давление, что не вносит значительных поправок при рассмотрении спектров частиц, проникающих из магнитослоя [Kirichev et al., 2017].

Данные о параметрах плазмы солнечного ветра и ММП были взяты на портале OMNIWeb (<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>). Как было отмечено выше, характеристики плазмы в области каспа начинают изменяться уже в течение 1–2 мин после изменения условий внешнего воздействия. Касп очень изменчив, но и достаточно инерционен: примерно 20 мин требуется для установления полного соответствия широтного положения и размеров каспа в отклик на изменение внешних условий [Pitout and Bogdanova, 2021]. Поэтому для изучения влияний компонент ММП на характеристики высыпаний мы использовали средние значения параметров межпланетной среды, наблюдаемые за 20 мин до начала регистрации каспа спутником F7. В нашем исследовании не могли быть использованы среднечасовые значения ММП, что существенно отразилось на статистике исследуемых событий. Во-первых, из-за того, что среднечасовые значения компонент ММП часто кардинально отличаются как по величине, так и по направлению от того, что наблюдается непосредственно перед регистрацией каспа. Во-вторых, при наличии среднечасовых значений данные по ММП непосредственно перед регистрацией каспа, по крайней мере, в 1986 г., часто отсутствуют.

Использование для исследования значений компонент ММП исключительно в период регистрации каспа, который для спутника F7, как правило, составляет 1–2 мин, может также привести к ошибочным выводам из-за некоторой инерционности каспальных высыпаний. Необходимо также принимать во внимание высокий уровень флуктуаций магнитного поля и параметров плазмы после прохождения солнечным вет-

ром ударной волны (см., например, обзор [Rakhmanova et al., 2021]). При этом магнитное поле непосредственно перед магнитопаузой может кардинально даже по знаку отличаться от направления магнитного поля в солнечном ветре [Пулинец и др., 2012].

### 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ И ПРИПОЛЮСНОЙ ГРАНИЦ КАСПА

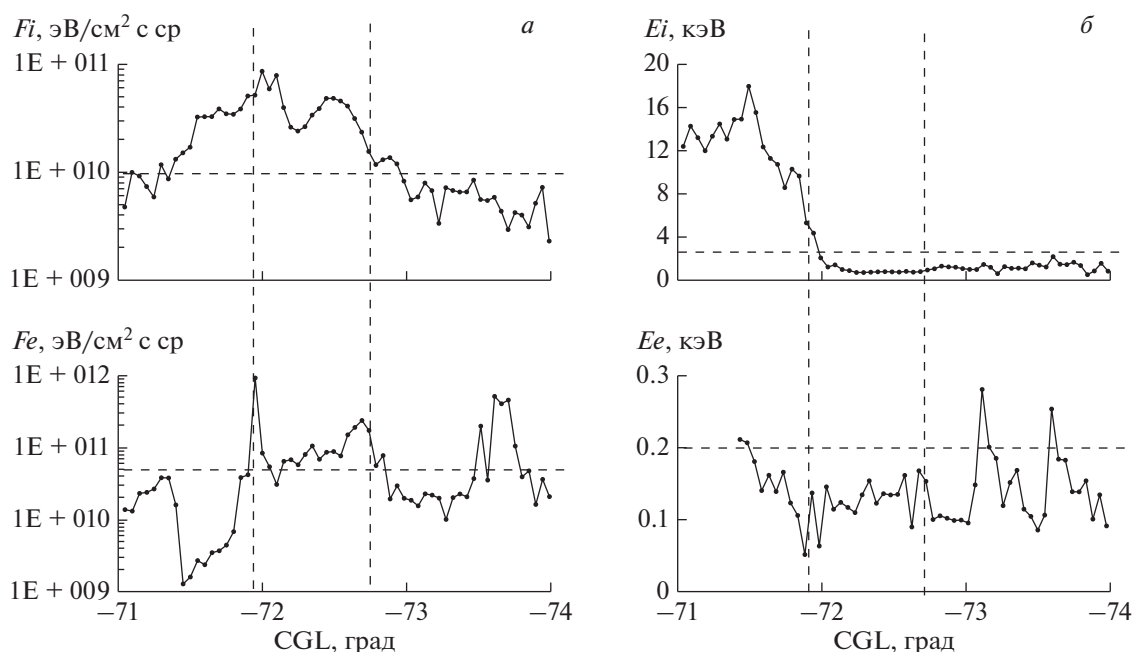
#### 3.1. Анализ данных спутника F7

По сопоставлению спутниковых наблюдений на различных высотах в [Newell and Meng, 1988] получены типичные характеристики частиц в различных областях высыпаний дневного сектора и определены критерии, позволяющие по наблюдениям высыпаящихся частиц на низковысотных спутниках идентифицировать высыпания в каспе и в соседних с ним областях. В [Newell et al., 1991] представлена автоматизированная система обработки (АСО) спутниковой информации, определяющая структуру авроральных высыпаний по данным спутников серии DMSP. Основой АСО является искусственная нейронная сеть с одним скрытым слоем, обученная на ряде примеров, позволяющих скорректировать ошибки идентификации. Данные по структуре высыпаний в каждом пролете представлены в виде таблиц, показывающих, среди прочего, исправленные геомагнитные координаты границ различных типов высыпаний. Высыпания полярного каспа идентифицируются при одновременном выполнении следующих, сформулированных в [Newell and Meng, 1988], критериев:

– средняя энергия: ионов  $300 \text{ эВ} < E_i < 3000 \text{ эВ}$ , электронов  $E_e < 220 \text{ эВ}$ ;

– поток энергии: ионов  $F_i > 10^{10} \text{ эВ/см}^2 \text{ с ср}$ , электронов  $F_e > 6 \times 10^{10} \text{ эВ/см}^2 \text{ с ср}$ .

В настоящей работе данные АСО использованы для отбора пролетов спутника F7, в которых были идентифицированы высыпания каспа. Всего за 1986 г. было зарегистрировано 798 таких пролетов, что составляет 14% от общего числа пролетов спутников в дневном секторе. В более узком секторе 10:00–14:00 MLT было обнаружено 543 случая регистрации каспа. Из этих событий были отобраны пролеты спутника с зарегистрированной классической последовательностью областей дневных высыпаний с увеличением широты: низкоширотный граничный слой (LLBL)–касп–мантия. Регистрация соседних к каспу областей является гарантией того, что спутник пересекал касп полностью, от его экваториальной границы до приполюсной. Рассматривались только области, которые регистрировались спутником более 4 с полетного времени. Всего за годовой период наблюдений было обнаружено 142 пе-



**Рис. 1.** Потоки энергии ( $F_i$ ,  $F_e$ ) и средние энергии ( $E_i$ ,  $E_e$ ) высыпавшихся ионов и электронов в полуденном секторе, зарегистрированные спутником F7 28 июня 1986 г. в интервале 01:29–01:31 UT. Горизонтальные штриховые линии – уровень критериев для определения каспа; вертикальные штриховые линии – границы каспа.

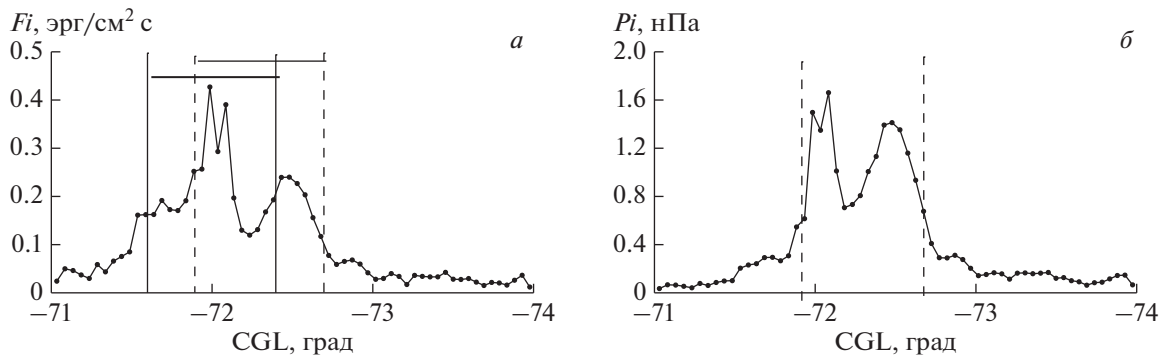
ресечения каспа, для которых были в наличии данные по плазме солнечного ветра и ММП.

Так как одной из основных целей настоящей работы является изучение широтных характеристик ионных высыпаний в области каспа, для большинства отобранных пролетов проводился анализ оригинальных данных спутника F7, в том числе и определение широты его экваториальной и приполюсной границ. Для определения границ каспа использовались те же самые критерии, что и при автоматизированной обработке данных. Оказалось, что в большинстве случаев широтное положение границ каспа, полученное в результате такого анализа, не совпадает с данными, опубликованными по АСО. Один из таких примеров иллюстрирует рис. 1, на котором показаны характеристики высыпавшихся частиц в дневном секторе 28 июня 1986 г. округленно в интервале 01:29–01:31 UT. Полярный касп в этом пролете был зарегистрирован в южном полушарии примерно в 01:30 UT на долготе  $\sim 11.9$  MLT. На рис. 1а показаны потоки высыпавшихся ионов и электронов ( $F_i$ ,  $F_e$ ) в единицах  $\text{эВ}/\text{см}^2 \text{ с ср}$ , а на рис. 1б их средние энергии ( $E_i$ ,  $E_e$ , кэВ). Точки на графиках соответствуют значению параметров, измеренных спутником. По горизонтальной оси отложена исправленная геомагнитная широта (CGL). Границы каспа определялись в соответствии с представленными выше критериями, уровень которых для всех категорий параметров показан горизонтальными штриховыми линиями, а грани-

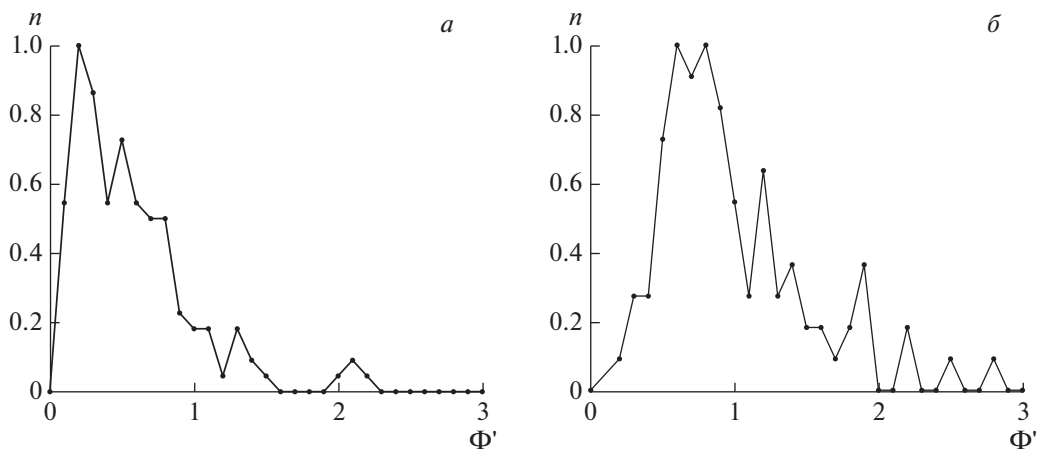
цы каспа указаны вертикальными штриховыми линиями. Экваториальную границу каспа в этом пролете определяет средняя энергия ионных высыпаний ( $E_i$ ), а приполюсную – поток энергии электронных высыпаний ( $F_e$ ). При этом, как и в АСО, последовательность идентификаций “касп”–“касп”–“не касп”–“касп”–“касп” определялась как касп.

На рис. 2а показано широтное распределение потока энергии высыпавшихся ионов, но уже в единицах  $\text{эрг}/\text{см}^2 \text{ с}$ . Вертикальными штриховыми линиями показаны границы каспа, определенные на рис. 1 из анализа данных спутника, а сплошными вертикальными линиями – границы каспа, определенные АСО. Очевидно существенное, примерно в  $0.3^\circ$  CGL, расхождение в положении границ. При этом в данном пролете F7 ширина каспа ( $\Delta\Phi'$ ), определенная по разнице широт его приполюсной и экваториальной границ, на рис. 1 и по таблицам АСО примерно совпадает. Однако, в других пролетах спутника за несовпадением в положении границ следуют и расхождения в широтных размерах каспа. Из 142 пролетов, отобранных по данным АСО в режиме “ручного” анализа спутниковых данных, было рассмотрено 106 пролетов.

Вероятность наблюдения каспа различной широтной протяженности иллюстрирует рис. 3. На рис. 3а показано распределение, полученное по данным АСО, общее число событий  $N = 142$ . По горизонтальной оси отложена ширина каспа в градусах исправленной геомагнитной широты.



**Рис. 2.** Широтное распределение потока энергии высыпающихся ионов (а) и ионного давления (б) в дневном секторе 28 июня 1986 г. в интервале 01:29–01:31 UT. Вертикальные штриховые линии – границы каспа, определенные из анализа данных спутника; сплошные вертикальные линии – границы каспа, определенные АСО.



**Рис. 3.** Наблюдения каспа различной широтной протяженности: (а) – распределение, полученное по данным АСО, (б) – распределение, полученное в результате прямого анализа спутниковых наблюдений. По горизонтальной оси – ширина каспа в градусах CGL. По вертикальной оси – нормированное к максимуму число регистраций каспа в каждом диапазоне  $\Delta\Phi'$  по  $0.1^\circ$ .

По вертикальной оси – нормированное к максимуму число регистраций каспа в каждом диапазоне  $\Delta\Phi'$  по  $0.1^\circ$ . Средняя ширина каспа  $\Delta\Phi'_c = 0.6^\circ$ , медианная ширина каспа  $\Delta\Phi'_m = 0.5^\circ$ . На рис. 3б представлено аналогичное распределение, но полученное в результате непосредственного детального анализа спутниковых наблюдений. Для этого распределения ( $N = 106$ ) средняя ширина каспа  $\Delta\Phi'_c = 1.0^\circ$ , а медианная –  $\Delta\Phi'_m = 0.9^\circ$ . Такое существенное различие в ширине каспа, составляющее  $\sim 0.3^\circ$  широты, обусловлено различием в идентификации границ каспа, осуществляемой АСО и прямым анализом спутниковых наблюдений. Как показывает рис. 3б,  $\Delta\Phi'$  может достигать  $\sim 3.0^\circ$  широты, но касп может быть и очень узким  $\sim 0.2^\circ$ .

### 3.2. Положение и ширина каспа в зависимости от $B_z$ - и $B_y$ -компонент ММП

В дальнейших исследованиях мы будем использовать данные о положении границ каспа, полученные в результате прямого анализа спутниковых наблюдений. В качестве теста на рис. 4а исследована зависимость широтного положения экваториальной границы каспа от  $B_z$  компоненты ММП. Хорошо известно [Wing et al., 2001; Pitout and Bogdanova, 2021 и ссылки в них], что при южной ориентации ММП экваториальная граница каспа ( $\Phi'_{eq}$ ) смещается к экватору с уменьшением  $B_z$ -компоненты. При северной ориентации ММП положение экваториальной границы каспа не зависит или слабо зависит от величины положительной  $B_z$ . Сплошные линии на рис. 4а соответствуют уравнениям линейной регрессии отдельно для  $B_z < 0$  и  $B_z > 0$ . Уравнения регрессии

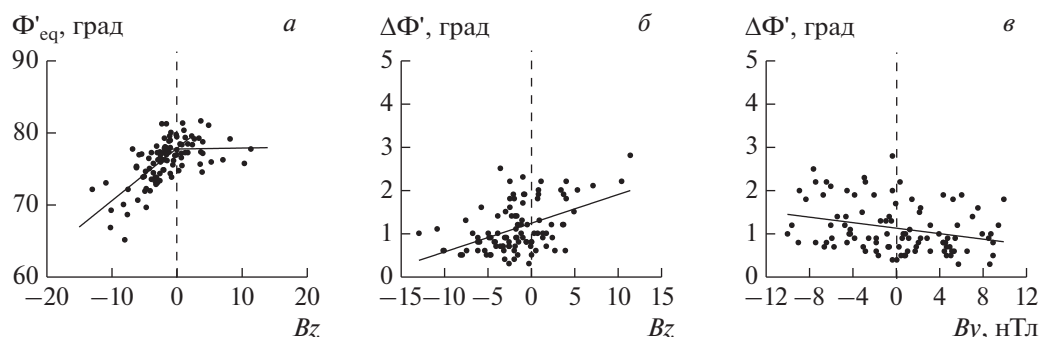


Рис. 4. Широта экваториальной границы каспа в зависимости от  $B_z$ -компоненты ММП (а); зависимости широтных размеров каспа от  $B_z$  (б) и  $B_y$  (в) компонент ММП. Сплошные линии соответствуют уравнениям линейной регрессии.

имеют вид:  $\Phi'_{eq} = 77.9 + 0.73B_z$  (коэффициент корреляции  $r_1 = 0.70$ ) и  $\Phi'_{eq} = 77.8 + 0.01B_z$  (коэффициент корреляции  $r_2 = 0.22$ ) для  $B_z < 0$  и  $B_z > 0$  соответственно. Характер поведения  $\Phi'_{eq} = \Phi'(B_z)$  подобен полученному другими исследователями. Уравнения регрессии наилучшим образом соответствуют данным [Wing et al., 2001], однако, коэффициент корреляции для нашего набора данных существенно выше, чем 0.54 и 0.04 при  $B_z < 0$  и  $B_z > 0$  соответственно в [Wing et al., 2001].

На рис. 4б и 4в показаны зависимости широтных размеров каспа от  $B_z$ - и  $B_y$ -компонент ММП. Сплошные линии на рисунках соответствуют уравнениям линейной регрессии с коэффициентами корреляции  $r = 0.47$  и  $r = 0.25$  для  $B_z$ - и  $B_y$ -компонент ММП соответственно. Разброс значений  $\Delta\Phi'$  на графиках значительный, что может определяться влиянием на ширину каспа других компонент ММП и таких параметров, как  $P_{sw}$ , угол наклона геомагнитного диполя, MLT регистрации каспа и др. Тем не менее, рис. 4б надежно указывает на следующие два фактора: во-первых, в среднем касп значительно шире при  $B_z > 0$ , чем при  $B_z < 0$ , во-вторых, в среднем  $\Delta\Phi'$  уменьшается с уменьшением  $B_z$ .

Рис. 4в показывает  $\Delta\Phi'$  в зависимости от  $B_y$ -компоненты ММП. Разброс точек на графике относительно уравнения линейной регрессии составляет  $\sim 1^\circ$  и более. Несмотря на низкий коэффициент корреляции, можно отметить небольшое, но систематическое уменьшение  $\Delta\Phi'$  с увеличением  $B_y$ . Такое поведение  $\Delta\Phi'$  может быть связано с различной шириной каспа в зависимости от MLT его регистрации. В работе [Воробьев и Ягодкина, 2022] рассмотрено событие, когда при  $B_y < 0$  касп значительно шире в предполуденном секторе, чем в послеполуденном. Средняя долгота пересечения спутником области дневных высыпаний по всему массиву данных, использованных на рис. 4, составляет 11.3 MLT. Данные, представленные на рис. 4в, дают основа-

ние полагать, что в предполуденные часы в среднем ширина каспа несколько больше при  $B_y < 0$ , чем при  $B_y > 0$ . Возможной причиной может быть сдвиг каспа при  $B_y > 0$  в послеполуденную сторону.

#### 4. ШИРОТНЫЙ ПРОФИЛЬ ИОННЫХ ВЫСЫПАНИЙ В ОБЛАСТИ КАСПА

Результаты анализа структуры ионных высыпаний в околополуденном секторе, особенно в области высыпаний полярного каспа, могут, согласно [Pitout and Bogdanova, 2021], в значительной степени определяться величиной и направлением магнитосферной конвекции, зависящей от  $B_z$ - и  $B_y$ -компонент ММП. При этом  $B_z$ -компонента ММП будет определять меридиональную компоненту конвекции плазмы в магнитосфере и ионосфере, а  $B_y$  ММП – зональную компоненту конвекции. Однако, такие простые представления не учитывают всю сложную картину электрических полей на широтах каспа. Структура крупномасштабных вихрей электрического поля на ионосферных высотах создается в процессе замыкания в ионосфере крупномасштабных продольных токов и определяется, в основном, как величинами крупномасштабных градиентов давления, так и ионосферной проводимостью. Сложная система продольных токов в полярных каспах (часто называемая токами зоны 0 или токами в каспе) существенно искажает картину течений внутри каспа. Поэтому редко удается наблюдать достаточно четкую картину. Тем не менее, в работе [Tsyganenko and Andreeva, 2018] проведено успешное моделирование искажения магнитного поля в каспе диамагнитными токами, учитывающее проникновение  $B_y$ -компоненты ММП в область каспа.

##### 4.1. Широтные профили ионного давления в каспе при $B_z$ ММП $< 0$

Конвекция в каспе начинает меняться через 1–2 мин после изменений условий внешнего воз-

действия. Учитывая это обстоятельство, для изучения структуры ионных высыпаний в каспе в зависимости от компонент ММП были отобраны только те события, при которых соответствующая компонента ММП была относительно стабильной. Стабильность компонент ММП определялась следующими условиями: в течение 20 мин интервала до начала регистрации каспальных высыпаний величина искомой компоненты ММП по абсолютному значению превышала 1.0 нТл и компонента не меняла знак в этом временном интервале. Такие достаточно жесткие условия существенно сократили статистический набор событий. Так, при отрицательной полярности  $B_z$ -компоненты ММП было отобрано только 33 случая регистрации каспа. Во всех этих событиях были проанализированы широтные профили потока энергии ионных высыпаний. В 17 пролетах спутника F7 было обнаружено два максимума  $Fi$ , один в экваториальной, а другой в приполюсной частях каспа, и в 16 пролетах профиль  $Fi$  имел один четко выраженный максимум в экваториальной части каспа. Каспы с двумя максимумами в широтном профиле  $Fi$  будем именовать как “два тах касп” в отличие от термина “двойной касп”, который подразумевает наличие двух независимых источников частиц.

Один из примеров “два тах каспа” был представлен выше на рис. 2а. В дальнейшем мы будем рассматривать не широтные профили  $Fi$ , а профили ионного давления ( $Pi$ ) в каспе, как это показано на рис. 2б. Для использования  $Pi$  есть следующие резоны. Во-первых, в связи с тем, что энергия ионов по всей ширине каспа меняется незначительно, широтные профили  $Fi$  и  $Pi$  очень похожи. Во-вторых, средний уровень  $Pi$  в каспе значительно больше, чем в соседних с ним областях высыпаний  $LLBL$  и мантии [Воробьев и др., 2020], поэтому касп является наиболее яркой чертой на профиле  $Pi$ . В-третьих, с использованием  $Pi$  появляется возможность сопоставления ионного давления в каспе с динамическим давлением солнечного ветра и давлением в магнитослое, возникающем при балансе давлений на магнитопаузе.

На рис. 2б границы каспа в этом пролете спутника показаны вертикальными штриховыми линиями. Средние параметры межпланетной среды для этого события в 20 мин интервале перед регистрацией каспа:  $\langle B_z \rangle = -3.9$  нТл,  $\langle B_y \rangle = -2.6$  нТл,  $\langle P_{sw} \rangle = 3.0$  нПа. Если вернуться еще раньше к рис. 1б, то можно видеть, что в области экваториальной границы каспа в интервале широт  $\sim 71.8^\circ - 72.5^\circ$  CGL энергия высыпающихся ионов уменьшается с увеличением широты. Точнее сказать, резко падает при переходе из области высокоширотного кольцевого тока, в соответствии с [Antonova et al., 2018], в область каспа. Изменение энергии электронов на рис. 1б также соответству-

ет такой интерпретации. В области более высокоширотного, приполюсного максимума величина  $Ei$  остается постоянной. Наблюдаемое в экваториальной части каспа уменьшение  $Ei$  с увеличением широты характерно для периодов южной ориентации ММП и антисолнечной конвекции плазмы в околополуденном секторе.

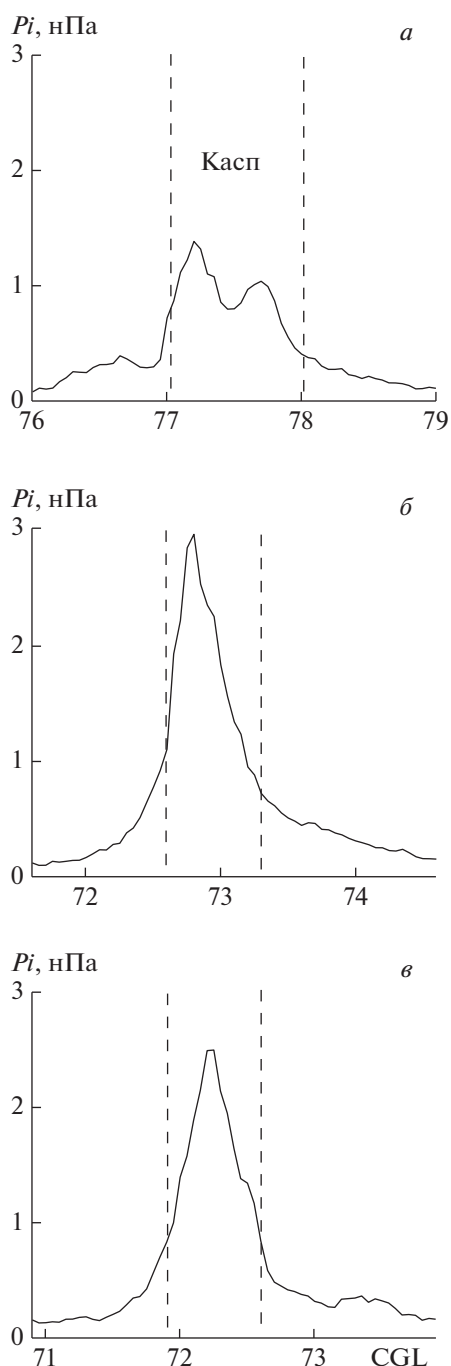
На рис. 5а показан широтный профиль ионного давления, полученный усреднением 12 событий регистрации “два тах каспа”. Профиль получен методом наложения эпох относительно среднего положения приполюсной и экваториальной границ каспа. Регистрации каспа спутником F7 осуществлялись в предполуденном секторе  $\langle MLT \rangle = 11.1$ . В среднем ширина “два тах касп” составила  $\sim 1.0^\circ$  широты при среднем значении вертикальной компоненты ММП  $\langle B_z \rangle = -3.0$  нТл. Величины  $B_z$ - и  $B_y$ -компонент ММП в рассматриваемых событиях были примерно равны, средняя величина  $B_y$  ММП по абсолютному значению  $\langle B_y \rangle = -2.8$  нТл. Динамическое давление солнечного ветра примерно соответствовало своему среднему невозмущенному уровню  $\langle P_{sw} \rangle = 2.8$  нПа. В широтном профиле  $Pi$  экваториальный максимум ионного давления составляет  $\sim 1.4$  нПа ( $Pi_{max}^1 = 0.5 P_{sw}$ ), а приполюсный  $\sim 1.0$  нПа ( $Pi_{max}^2 = 0.4 P_{sw}$ ) с минимумом между ними на уровне  $\sim 0.8$  нПа.

Во всех событиях “два тах касп” средняя энергия высыпающихся ионов в экваториальной части каспа убывает с увеличением широты. Уменьшение  $Ei$  начинается на  $0.2^\circ - 0.4^\circ$  ниже экваториальной границы каспа в области  $LLBL$  и регистрируется примерно до минимума в широтном профиле  $Pi$ . Далее, с увеличением широты примерно в половине событий средняя энергия высыпающихся ионов остается неизменной, а в других – слабо растет с увеличением широты.

Широтные профили ионного давления с одним максимумом можно разбить на два типа: с максимумом  $Pi$ , смещенным к экваториальной части каспа (12 пролетов), и с максимумом примерно в центре каспа (4 пролета). Средние профили для этих двух типов распределения, полученные методом наложения эпох, показаны на рис. 5б и 5в. На рис. 5б максимум  $Pi$  располагается в экваториальной части каспа, средняя ширина каспа  $\langle \Delta\Phi \rangle = -0.7^\circ$ ,  $\langle MLT \rangle = 11.7$ , средние значения компонент ММП:  $\langle B_z \rangle = -5.8$  нТл,  $\langle B_y \rangle = 3.1$  нТл. Динамическое давление солнечного ветра в период регистрации профилей такого типа  $\langle P_{sw} \rangle = 4.0$  нПа, а максимум ионного давления  $\langle Pi_{max} \rangle = 3.0$  нПа ( $Pi_{max} = 0.8 P_{sw}$ ).

Рисунок 5в иллюстрирует средний широтный профиль ионного давления с максимумом  $Pi$  в центре каспа. Средняя ширина каспа, как и на рис. 5б, составляет  $0.7^\circ$ , среднее MLT регистрации 12.2, значения компонент ММП:  $\langle B_z \rangle =$





**Рис. 5.** Средние широтные профили ионного давления ( $P_i$ ) в каспе при отрицательных значениях  $B_z$  компоненты ММП: (а) —  $\langle B_z \rangle = -3.0$  нТл,  $\langle |B_y| \rangle = 2.8$  нТл; (б) —  $\langle B_z \rangle = -5.8$  нТл,  $\langle |B_y| \rangle = 3.1$  нТл; (в) —  $\langle B_z \rangle = -7.1$  нТл,  $\langle |B_y| \rangle = 2.6$  нТл. Вертикальные штриховые линии — границы каспа.

$= -7.1$  нТл,  $\langle |B_y| \rangle = 2.6$  нТл. Динамическое давление солнечного ветра  $\langle P_{sw} \rangle = 3.8$  нПа, максимум ионного давления  $\langle P_{imax} \rangle = 2.6$  нПа ( $P_{imax} = 0.7 P_{sw}$ ).

Сравнение рисунков 5а, 5б и 5в показывает, что с ростом отрицательных значений  $B_z$ -компо-

ненты ММП происходит смещение каспа в более низкие широты, ширина каспа уменьшается, исчезает приполюсный максимум (рис. 5б, 5в).

#### 4.2. Широтный профиль ионного давления при $B_z$ ММП $> 0$

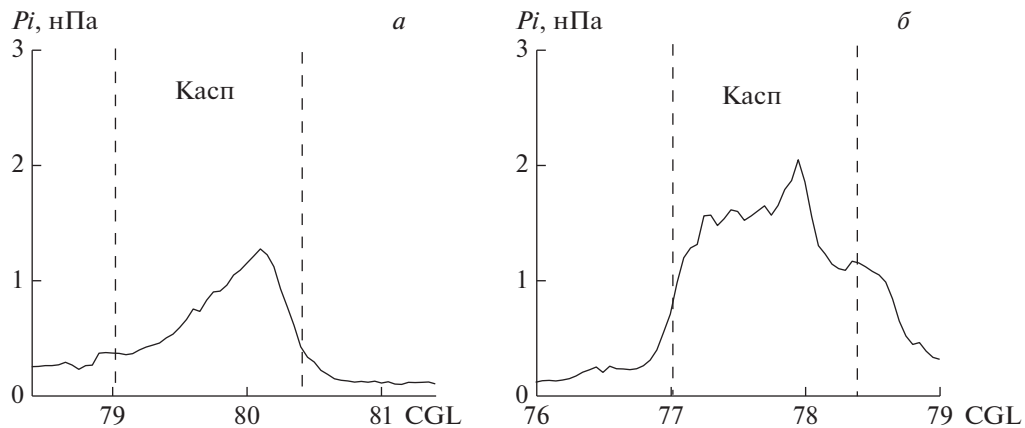
При  $B_z$  ММП  $> 0$ , чтобы ограничить влияние  $B_y$ -компоненты на широтный профиль ионных высыпаний, были наложены некоторые ограничения на величину  $B_y$ : рассматривались только такие пролеты, при которых в 20 мин интервале до регистрации каспа  $|B_y| < 4$  нТл и  $|B_y| < 1.5 B_z$ .

При относительно стабильных положительных значениях вертикальной компоненты ММП в единичных событиях наблюдались профили  $P_i$  различной конфигурации: широкий профиль с плоской вершиной (3 пролета) или широкий плоский профиль с некоторым увеличением  $P_i$  в центральной части каспа (2 пролета). Однако, наиболее характерным для ММП  $B_z > 0$  является профиль  $P_i$  с максимумом ионного давления, смещенным к приполюсной части каспа (11 пролетов). Средний широтный профиль такого типа, полученный методом наложения эпох, показан на рис. 6а. Широтные размеры каспа при  $B_z > 0$  существенно больше, чем при  $B_z < 0$  и составляют в среднем  $1.4^\circ$  широты, среднее геомагнитное время регистрации каспа 11.6 MLT. Средние параметры межпланетной среды:  $\langle B_z \rangle = 2.2$  нТл,  $\langle |B_y| \rangle = 2.2$  нТл,  $\langle P_{sw} \rangle = 3.3$  нПа. Экваториальная граница каспа располагалась на широте  $\sim 79^\circ$  CGL, что на  $\sim 1.0^\circ$  CGL выше, чем на рис. 5а при  $\langle B_z \rangle = -3.0$  нТл. Величина ионного давления в максимуме  $\langle P_{imax} \rangle = 1.3$  нПа ( $P_{imax} = 0.4 P_{sw}$ ), что примерно соответствует максимуму давления в каспе при близких, но отрицательных значениях  $B_z$ -компоненты ММП.

Поведение средних энергий ионных высыпаний с изменением широты неоднозначно. Только в трех из рассмотренных событий наблюдался ожидаемый для периодов  $B_z > 0$  рост  $E_i$  в каспе или в приполюсной его части с увеличением широты. Более характерным является отсутствие дисперсии или слабый рост  $E_i$  с ростом  $\Phi'$ .

#### 4.3. Широтный профиль ионного давления при больших значениях $B_y$ компоненты ММП

Для изучения влияния  $B_y$ -компоненты ММП на широтный профиль ионных высыпаний были отобраны события, удовлетворяющие следующим условиям:  $|B_y| > 4.0$  нТл и  $|B_y| > 1.5|B_z|$ . Согласно [Wing et al., 2001; Pitout et al., 2009], такие условия должны быть наиболее благоприятными для формирования двух источников высыпавшихся частиц в каспе и, соответственно, двойного каспа. Однако, из 31 случая регистрация каспа, когда доминирующей являлась  $B_y$ -компонента



**Рис. 6.** Средние широтные профили ионного давления в каспе: (а) — при положительной  $B_z$ -компоненте ММП,  $\langle B_z \rangle = 2.2$  нТл,  $\langle B_y \rangle = 2.2$  нТл; (б) — при большой отрицательной  $B_y$ -компоненте ММП,  $\langle B_y \rangle = -6.3$  нТл,  $\langle B_z \rangle = -1.7$  нТл.

ММП, только в 6 случаях широтный профиль  $P_i$  имел в каспе два максимума. В настоящей работе более подробно рассмотрены регистрации каспа при  $B_z < 0$  и больших отрицательных значениях  $B_y$ -компоненты. Таких событий было зарегистрировано 16, из которых в 4 пересечениях каспа широтный профиль  $P_i$  имел два максимума, один в экваториальной, а другой в приполюсной части каспа. Наиболее характерным для периодов с большой отрицательной  $B_y$  ММП является широкий касп с плоской вершиной в широтном профиле  $P_i$  и при наличии в отдельных случаях локального максимума в какой-либо части каспа.

Средний широтный профиль ионного давления, полученный методом наложения эпох, при  $B_z < 0$  и  $B_y < 0$  показан на рис. 6б. Средняя ширина каспа составляет  $\langle \Delta\Phi \rangle = 1.4^\circ$  CGL. Отметим высокий уровень ионных высыпаний на приполюсной границе каспа и в экваториальной части магнитосферы, составляющий более 0.5 от уровня давления в каспе. Средняя долгота регистрации каспа  $\langle MLT \rangle = 11.1$ . Средние значения параметров межпланетной среды:  $\langle B_z \rangle = -1.7$  нТл,  $\langle B_y \rangle = -6.3$  нТл,  $\langle P_{sw} \rangle = 3.4$  нПа. Среднее значение ионного давления в каспе не превышает 2.0 нПа ( $P_{i\max} = 0.6 P_{sw}$ ).

Средняя энергия высыпающихся ионов в каспе, как правило, уменьшается с увеличением широты. Такое поведение  $E_i$  косвенно указывает на антисолнечное направление конвекции в области каспа.

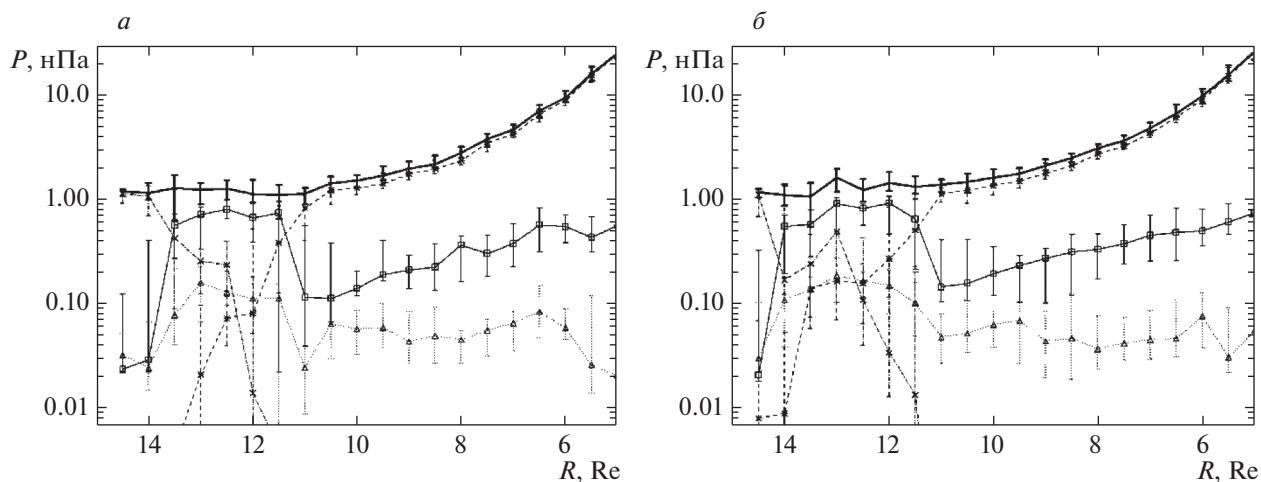
### 5. РАДИАЛЬНЫЙ ПРОФИЛЬ ДАВЛЕНИЯ В ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ ПРИ ПЕРЕХОДЕ ИЗ МАГНИТОСФЕРЫ В МАГНИТОСЛОЙ

К сожалению, практически не проводилось сравнение одновременных наблюдений высыпа-

ний в каспе с результатами высокоапогейных наблюдений во внешних областях каспа, что было бы крайне интересно при анализе процессов образования каспа и его динамики. Поэтому пока можно только сравнить усредненные распределения при пересечении каспа с усредненными распределениями в магнитослое, полученными вблизи экваториальной плоскости в долготном секторе каспа при близких значениях геомагнитной активности и параметров солнечного ветра и ММП. В работе [Воробьев и др., 2022] была продемонстрирована эффективность сравнения данных DMSP с находящимися в открытом доступе данными миссии THEMIS (<http://themis.ssl.berkeley.edu/>, <http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>) для ночного сектора. В настоящем исследовании используется та же база данных THEMIS, но для полуденного сектора.

Рисунок 7 показывает усредненный ход компонент давления в экваториальной плоскости, полученный при усреднении пролетов спутников THEMIS в магнитоспокойных условиях при  $Dst$  в диапазоне от 0 до  $-10$  нТл и  $AL$  — от 0 до  $-200$  нТл при динамическом давлении солнечного ветра от 1.5 до 3.5 нПа. На рис. 7а показаны компоненты давления при ММП  $B_z < 0$ , а на рис. 7б при ММП  $B_z > 0$  в угловом секторе  $\pm 10^\circ$  от полуденного меридиана. Толстая черная линия на рисунке показывает интегральное давление, суммирующее давление ионов (сплошная тонкая линия), электронов (точечная линия), магнитного поля (пунктир) и динамического давления (штрих пунктир). Вертикальные отрезки содержат медианные значения усредняемых величин на данном геоцентрическом расстоянии.

При южном и при северном ММП наблюдается постоянство полного давления, соответствующего динамическому давлению солнечного ветра от солнечного ветра перед ударной волной до



**Рис. 7.** Радиальное распределение компонент давления при переходе из солнечного ветра в магнитосферу при южной (а) и северной (б) ориентации ММП. Интегральное давление показано сплошной толстой кривой, магнитное – пунктиром, ионное – сплошной тонкой кривой, электронное – точечной кривой, динамическое – штрих пунктиром.

магнитосферы. После пересечения магнитопаузы вклад магнитного давления становится доминирующим. Внутри магнитослоя, в соответствии с рис. 7, основной вклад в интегральное давление вносят термализованные ионы. Усредненные профили ионного давления в магнитослое практически не отличаются при южной и северной ориентации ММП. Вклад электронов невелик во всем исследованном интервале, что хорошо подтверждает использованное выше предположение о малости вклада электронов в давление в каспе. Различия в ходе радиальных профилей давления при  $B_z < 0$  и  $B_z > 0$ , как известно (см., ссылки в работе [Kirpichev et al., 2017]), имеет место непосредственно перед магнитопаузой, где при  $B_z < 0$  возникает сравнительно тонкий токовый слой (тонкая магнитопауза) с резким переходом от магнитослоя к магнитосфере, а для  $B_z > 0$  характерен достаточно плавный переход от магнитослоя к магнитосфере и возникает достаточно протяженная область с толщиной в тысячи км (“толстая” магнитопауза). При этом может быть выделена область, в которой постепенное нарастание магнитного давления компенсирует падение давления плазмы (*plasma depletion layer*). Данная особенность может иметь непосредственное отношение к процессам затекания плазмы магнитослоя в область каспа, размеры и положение которой контролируется ММП, проникающим внутрь магнитосферы в условиях магнитоэстатического равновесия. В работе [Rapov et al., 2008] отмечалось, что при сравнении давления в магнитослое и каспе необходимо делать поправку, умножая динамическое давление в магнитослое на  $\cos^2(\phi)\cos^2(\theta)$ , где  $\phi$  и  $\theta$  – геомагнитные широта и долгота области наблюдения. Эта поправка для каспа на широте  $72^\circ$  вблизи полудня составляет

$\sim 0.01$ . В соответствии с рис. 7, основной вклад в баланс давлений в области каспа вносит тепловое давление ионов, которое в среднем составляет  $\sim 0.8$  от динамического давления солнечного ветра. Такое соотношение между максимальным давлением в каспе и динамическим давлением солнечного ветра хорошо соответствует значениям на рис. 5 при ММП  $B_z < 0$ , когда касп смещается к низким широтам. Сдвиг каспа к полюсу приводит к меньшим давлениям в каспе при ММП  $B_z > 0$ . Величина соотношения между максимумом давления в каспе и динамическим давлением солнечного ветра при северной ориентации ММП требует дополнительного анализа. Таким образом, характеристики плазмы в каспе, в основном, соответствуют характеристикам плазмы в магнитослое. Процессы ускорения при взаимодействии частиц с турбулентностью в каспе, видимо, не приводят к существенному изменению давления. Таким образом, измерения давления в области каспа на низковысотном спутнике содержит информацию о величине давления в каспе вблизи магнитопаузы, по крайней мере, при ММП  $B_z < 0$ , что представляет интерес при сравнении предсказаний моделей формирования магнитосферы с данными экспериментальных наблюдений.

Показанные на рис. 5б и 5в распределения давления с максимумом в каспе хорошо иллюстрирует формирование диамагнитной полости в области каспа, где максимум давления соответствует области минимального магнитного давления на больших высотах. Такой максимум можно отследить только на низколетящем спутнике, так как высокоапогейные спутники двигаются достаточно медленно и за время пересечения области каспа распределение давления может существенно

изменяться. Поэтому информация о положении максимума давления может быть использована при совершенствовании моделей магнитного поля в каспе, создаваемых с учетом токов в области каспа, таких как модель [Tsyganenko and Andreeva, 2018], и сравнении предсказаний моделей магнитного поля с конкретными пролетами через касп на низких высотах.

Особый интерес представляют случаи с двумя максимумами давления, показанные на рис. 5а, которые непросто объяснить в рамках разрабатываемых моделей. Наряду с подходом, развитым в работе [Wing et al., 2001], не исключены и другие объяснения. Так, например, были зафиксированы проникновения через магнитопаузу плазменных струй (см. ссылки в обзоре [Pitout and Bogdanova, 2021]), динамическое давление в которых в несколько раз превышает динамическое давление солнечного ветра. Проникновение таких струй в касп может существенно изменить равновесную картину распределения давления ионов. Можно также вспомнить, что касп представляет собой воронку, заполнение которой изменяется при изменении давления солнечного ветра, а форма и размер при изменении ММП. Гидродинамическая структура заполняющейся воронки, как известно, содержит минимум давления в центре и максимум на краях. Однако, проверка таких предположений также, как и модели [Wing et al., 2001], требует тщательного анализа всех имеющихся данных наблюдений на разных высотах и проведения новых измерений.

## 6. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведенное рассмотрение показало, что анализ пересечений низколетящими спутниками областей высыпания полярных каспов могут дать новую информацию о свойствах и динамике каспов. В настоящей работе данные спутника DMSP F7 использованы для изучения особенностей широтного распределения характеристик высыпающихся ионов в области дневного полярного каспа и ионного давления. Отбор пролетов спутника F7 в околополуденном секторе, при которых был зарегистрирован полярный касп, осуществлялся с использованием данных автоматизированной системы обработки (АСО), разработанной на основе искусственной нейронной сети [Newell et al., 1991]. Для большинства из отобранных таким образом пролетов нами был проведен анализ оригинальных данных спутника F7, в том числе и определение широты его экваториальной и приполюсной границ. Обнаружено существенное различие в средней ширине каспа, составляющее  $\sim 0.3^\circ$  широты, обусловленное различием в идентификации его границ, осуществляемой АСО и прямым анализом спутниковых наблюдений. Ширина каспа ( $\Delta\Phi'$ ) определялась разницей широты

его приполюсной и экваториальной границ. Средняя долгота пересечения спутником дневного полярного каспа по всему массиву данных составляет 11.3 MLT. Таким образом, все полученные результаты относятся к предполуденному сектору MLT.

В качестве теста данные прямого анализа спутниковых наблюдений использованы для исследования хорошо известной из литературных источников зависимости широтного положения экваториальной границы каспа от  $B_z$ -компоненты ММП. Полученные уравнения регрессии отдельно для  $B_z < 0$  и  $B_z > 0$  наилучшим образом соответствуют данным [Wing et al., 2001], однако, с более высокими коэффициентами корреляции.

Исследована зависимость широтных размеров каспа от  $B_z$ - и  $B_y$ -компонент ММП. Получены уравнения линейной регрессии с небольшими коэффициентами корреляции  $r = 0.47$  и  $r = 0.25$  для  $B_z$ - и  $B_y$ -компонент ММП соответственно. Разброс значений  $\Delta\Phi'$  на графиках значительный, что может определяться влиянием других параметров внешнего воздействия на ширину каспа. Тем не менее, полученные данные надежно указывают на следующие два существенных фактора. Во-первых, в среднем касп значительно шире при  $B_z > 0$ , чем при  $B_z < 0$ . Во-вторых, полученные данные дают основание полагать, что в предполуденные часы в среднем ширина каспа несколько больше при  $B_y < 0$ , чем при  $B_y > 0$ .

Основной целью работы являлось изучение особенностей широтного распределения характеристик высыпающихся ионов в области каспа и их связи с  $B_z$  и  $B_y$  компонентами ММП. В качестве основного параметра, характеризующего широтную структуру ионных высыпаний в каспе, рассматривался уровень ионного давления ( $P_i$ ), с использованием которого появляется возможность сопоставления ионного давления в каспе с динамическим давлением солнечного ветра и давлением в магнитослое. Проведенное сравнение полученных распределений давления в каспе с усредненным распределением давления в магнитослое показало неплохое соответствие, что подтверждает возможность рассмотрения каспов в большинстве случаев в качестве входящей до ионосферных высот диамагнитной полости, давление в которой уравнивается давлением (в основном ионов) в магнитослое.

Анализ всего массива данных указывает на то, что характер ионных высыпаний в каспе очень изменчив. Широтная структура высыпаний в каспе зависит не только от параметров внешнего воздействия и их комбинации, но еще и от времени, прошедшего после изменения какого-либо из этих параметров. В этой связи, полученные в настоящем исследовании результаты нужно рассматривать как черты высыпаний, характерные

для той или иной компоненты ММП при ее относительной стабильности.

Основные полученные результаты можно сформулировать следующим образом.

1. При отрицательных значениях  $B_z$ -компоненты ММП характерной чертой каспа является широтный профиль  $P_i$  с двумя максимумами, один из которых находится в экваториальной, а другой в приполюсной части каспа, либо широтный профиль с одним четко выраженным максимумом в экваториальной его части.

2. В среднем ширина каспа с двумя максимумами составляет  $\sim 1.0^\circ$  широты при больших и примерно равных значениях компонент ММП  $\langle B_z \rangle = -3.0$  нТл и  $\langle |B_y| \rangle = 2.8$  нТл. В широтном профиле  $P_i$  экваториальный максимум ионного давления составляет  $P_i \max^1 = 0.5 P_{sw}$ , а приполюсный  $P_i \max^2 = 0.4 P_{sw}$ .

3. При больших отрицательных значениях  $B_z$  компоненты ММП ( $|B_z| = 6-7$  нТл) приполюсный максимум в широтном профиле  $P_i$  исчезает, остается только экваториальный максимум, уровень  $P_i$  в максимуме увеличивается,  $P_i \max = 0.8 P_{sw}$ , а ширина каспа уменьшается в среднем до  $\langle \Delta\Phi' \rangle = 0.7^\circ$ .

4. При  $B_z$  ММП  $> 0$  наиболее характерным является профиль  $P_i$  с максимумом ионного давления в приполюсной части каспа. Касп располагается в более высоких широтах, чем при  $B_z < 0$ , его средние широтные размеры увеличиваются в среднем до  $\sim 1.4^\circ$  широты. Величина ионного давления в максимуме  $P_i \max = 0.4 P_{sw}$ , что примерно соответствует максимуму давления в каспе при близких по модулю, но отрицательных значениях  $B_z$ .

5. Наиболее характерным для периодов с большой отрицательной  $B_y$  ММП ( $\langle B_y \rangle = -6.3$  нТл,  $\langle B_z \rangle = -1.7$  нТл) является широкий касп с плоской вершиной в широтном профиле  $P_i$ . Средняя ширина каспа составляет  $\langle \Delta\Phi' \rangle = 1.4^\circ$  CGL, а величина ионного давления в максимуме  $P_i \max = 0.6 P_{sw}$ .

6. Давление ионов в каспе определяется давлением ионов в магнитослое перед каспом. Максимум давления ионов при наблюдениях на малых высотах может указывать на величину давления плазмы в магнитослое перед областью каспа.

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данные низковысотного спутника DMSP F7 использованы для анализа широтных характеристик ионных высыпаний в области дневного полярного каспа и изучения широтного профиля ионного давления в каспе в зависимости от параметров ММП. Показано, что при небольших отрицательных значениях  $B_z$ -компоненты ММП характерной чертой каспа является широтный

профиль ионного давления ( $P_i$ ) шириной  $\sim 1^\circ$  широты с двумя максимумами, один из которых находится в экваториальной, а другой в приполюсной части каспа. При больших отрицательных значениях  $B_z$  приполюсный максимум в широтном профиле  $P_i$  исчезает, остается только экваториальный максимум, уровень  $P_i$  в максимуме увеличивается, а ширина каспа уменьшается до  $\sim 0.7^\circ$ . При  $B_z$  ММП  $> 0$  наиболее характерным является профиль  $P_i$  с максимумом ионного давления в приполюсной части каспа. Касп при  $B_z > 0$  располагается в более высоких широтах, чем при  $B_z < 0$ , его средние широтные размеры увеличиваются до  $\sim 1.4^\circ$  широты. В предполуденном секторе MLT наиболее характерным для периодов с большой отрицательной  $B_y$ -компонентой ММП является касп шириной  $\sim 1.4^\circ$  широты с плоской вершиной в широтном профиле  $P_i$ . Сравнение наблюдаемых на низких высотах распределений давления с данными высокоапогейных спутников THEMIS подтвердило возможность описания формирования каспа как диамагнитной полости и использования наблюдений в каспе для определения давления ионов в магнитослое.

Полученные в настоящем исследовании результаты позволили выявить не полностью описанные ранее особенности распределения потоков частиц в каспах. Вычисление давления ионов в областях каспов на малых высотах и его сравнение с давлением в магнитослое позволило подтвердить существование баланса давлений в области, где мал или полностью отсутствует вклад давления магнитного поля. Результаты работы могут быть полезны при создании моделей магнитного поля с учетом диамагнитных токов в каспе и при описании процессов формирования каспов. Полученные результаты могут быть также полезны при реализации космической программы SMILE. Случаи наблюдений давления в каспе на малых высотах требуют дополнительного тщательного анализа.

## БЛАГОДАРНОСТИ

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/>), данные спутников миссии THEMIS на страницах (<http://themis.ssl.berkeley.edu/>, <http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>).

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследования, выполненные В.Г. Воробьевым, поддержаны Российским научным фондом РФФ, проект 22-12-20017.

## 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
- Воробьев В.Г., Ягодкина О.И., Антонова Е.Е. Давление ионов в различных областях авроральных высыпаний дневного сектора // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 60. № 6. С. 740–750. 2020.  
https://doi.org/10.31857/S0016794020060140
- Воробьев В.Г., Ягодкина О.И. Особенности структуры высыпаний дневного полярного каспа при северном межпланетном магнитном поле // Известия РАН. Серия физическая. Т. 86. № 12. С. 1804–1809. 2022.  
https://doi.org/10.31857/S0367676522120304
- Воробьев В.Г., Ягодкина О.И., Антонова Е.Е., Кирпичев И.П. Влияние экстремальных уровней динамического давления солнечного ветра на структуру ночных авроральных высыпаний // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 62. № 6. С. 713–720. 2022.  
https://doi.org/10.31857/S0016794022060165
- Пулинец М.С., Рязанцева М.О., Антонова Е.Е., Кирпичев И.П. Зависимость параметров магнитного поля вблизи подсолнечной точки магнитосферы от межпланетного магнитного поля по данным эксперимента THEMIS // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 52. № 6. С. 769–778. 2012.
- Antonova E.E., Vorobjev V.G., Kirpichev I.P., Yagodkina O.I., Stepanova M.V. Problems with mapping the auroral oval and magnetospheric substorms // Earth, Planets and Space. V. 67.  
https://doi.org/10.1186/s40623-015-0336-6
- Antonova E.E., Stepanova M., Kirpichev I.P., Ovchinnikov I.L., Vorobjev V.G., Yagodkina O.I., Riazantseva M.O., Vovchenko V.V., Pulinets 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.-Ter. Phys. V. 177. P. 103–114, 2018.  
https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.10.013
- Antonova E.E., Stepanova M.V. The impact of turbulence on physics of the geomagnetic tail // Front. Astron. Space Sci. V. 8. 622570.  
https://doi.org/10.3389/fspas.2021.622570
- Antonova E.E., Stepanova M.V., Kirpichev I.P. Main features of magnetospheric dynamics in the conditions of pressure balance // J. Atm. Sol.-Ter. Phys. V. 242. 2023.  
https://doi.org/10.1016/j.jastp.2022.105994
- Baker K.B., Wing S. A new magnetic coordinate system for conjugate studies at high latitudes // J. Geophys. Res. V. 94. № A7. P. 9139–9144. 1989.  
https://doi.org/10.1029/JA094iA07p09139
- Bogdanova Y.V., Owen C.J., Siscoe G., Fazakerley A.N., Dandouras I., Marghitu O. et al. Cluster observations of the magnetospheric low-latitude boundary layer and cusp during extreme solar wind and interplanetary magnetic field conditions: I. 10 November 2004 ICME // Solar Physics. V. 244. P. 201–232. 2007.  
https://doi.org/10.1007/s11207-007-0417-1
- Escoubet C.P., Berchem J., Bosqued J.M., Trattner K.J., Taylor M., Pitout F., Vallat C., Laakso H., Masson A., Dunlop M., Reme H., Dandouras I., Fazakerley A. Two sources of magnetosheath ions observed by Cluster in the mid-altitude polar cusp // Adv. Space Res. V. 41. № 10. P. 1528–1536. 2008.  
https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.04.031
- Esmaeili A., Kalae M.J. Double-cusp simulation during northward IMF using 3D PIC global code // Astrophys. Space Sci. V. 362. P. 124–129. 2017.  
https://doi.org/10.1007/s10509-017-3098-8
- Fuselier S.A., Trattner K.J., Petrinc S.M. Cusp observations of high- and low-latitude reconnection for northward interplanetary magnetic field // J. Geophys. Res. V. 105. № A1. P. 253–266. 2000.  
https://doi.org/10.1029/1999JA900422
- Kirpichev I.P., Antonova E.E., Stepanova M. Ion leakage at dayside magnetopause in case of high and low magnetic shears // J. Geophys. Res. Space Physics. V. 122. № 8. P. 8078–8095. 2017.  
https://doi.org/10.1002/2016JA023735
- Newell P.T., Meng C.-I. The cusp and the cleft/boundary layer: low-altitude identification and statistical local time variation // J. Geophys. Res. V.93. № A12. P. 14549–14556. 1988.  
https://doi.org/10.1029/JA093iA12p14549
- 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. 1991.  
https://doi.org/10.1029/90JA02450
- 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
- Newell P.T., Sotirelis T., Liou K., Meng C.-I., Rich F.J. Cusp latitude and the optimal solar wind coupling function // J. Geophys. Res. V. 111. A09207. 2006.  
https://doi.org/10.1029/2006JA011731
- Onsager T.G., Kletzing C.A., Austin J.B., MacKiernan H. Model of magnetosheath plasma in the magnetosphere: Cusp and mantle particles at low-altitudes // J. Geophys. Res. V. 20. № 6. P. 479–482. 1993.  
https://doi.org/10.1029/93GL00596
- Panov E.V., Buchner J., Franz M., Korth A., Savin S.P., Reme H., Fornaçon R.-H. High-latitude Earth’s magnetopause outside the cusp: Cluster observations // J. Geophys. Res. V. 113. A01220. 2008.  
https://doi.org/10.1029/2006JA012123
- Pitout F., Escoubet C.P., Klecker B., Dandouras I. Cluster survey of the mid-altitude cusp – Part 2: Large-scale morphology // Ann. Geophys. V. 27. P. 1875–1886. 2009.  
www.ann-geophys.net/27/1875/2009
- Pitout F., Bogdanova Y.V. The polar cusp seen by Cluster // J. Geophys. Res. V. 126. № 9. 2021.  
https://doi.org/10.1029/2021JA029582
- Rakhmanova L., Riazantseva M., Zastenker G. Plasma and magnetic field turbulence in the Earth’s magnetosheath

- at ion scales // *Front. Astron. Space Sci.* V. 7. 616635. 2021.  
<https://doi.org/10.3389/fspas.2020.616635>
- *Reiff P.H., Hill, T.W., Burch J.L.* Solar wind plasma injection at the dayside magnetospheric cusp // *J. Geophys. Res.* V. 82. № 4. P.479–491.1977.  
<https://doi.org/10.1029/JA082i004p00479>
- *Ruohoniemi J.M., Greenwald R.A.* Statistical patterns of high-latitude convection obtained from Goose Bay HF radar observations // *J. Geophys. Res.* V. 101. № A10. P. 21 743–21 763. 1996.  
<https://doi.org/10.1029/96JA01584>
- *Siscoe G., Kaymaz Z., Bogdanova, Y.V.* Magnetospheric cusps under extreme conditions: Cluster observations and MHD simulations compared // *Solar Physics.* V. 244. P. 189–199. 2007.  
<https://doi.org/10.1007/s11207-007-0359-7>
- *Sonnerup B.U., Paschmann O.G., Papamastorakis I., Sckopke N., Haerendel G., Bame S.J., Asbridge J.R., Gosling J.T., Russell C.T.* Evidence for magnetic field reconnection at the Earth's magnetopause // *J. Geophys. Res.* V. 86. P. 10049–10067. 1981.  
<https://doi.org/10.1029/JA086iA12p10049>
- *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>
- *Tsyganenko N.A., Andreeva V.A.* Empirical modeling of dayside magnetic structures associated with polar cusps // *J. Geophys. Res.* V. 123. № A11. P. 9078–9092. 2018.  
<https://doi.org/10.1029/2018JA02588>
- *Wing S., Newell P.T., Onsager T.G.* Modeling the entry of magnetosheath electrons into the dayside ionosphere // *J. Geophys. Res.* V. 101. № A6. P. 13155–13167. 1996.  
<https://doi.org/10.1029/96JA00395>
- *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>
- *Wing S., Newell P.T., Rouhoniemi J.M.* Double cusp: model prediction and observational verification // *J. Geophys. Res.* V. 106. № A11. P. 25 571–25 593. 2001.  
<https://doi.org/10.1029/2000JA000402>