

УДК 550.338.1

ИОНОСФЕРНЫЕ ЧЕРТЫ ВЫСЫПАНИЙ ДНЕВНОГО ПОЛЯРНОГО КАСПА ПРИ СЕВЕРНОМ ММП

© 2024 г. В. Г. Воробьев^{1, *}, О. И. Ягодкина^{1, **}, Е. Е. Антонова^{2, 3, ***}

¹Полярный геофизический институт (ПГИ), Апатиты (Мурманская обл.), Россия

²Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына
Московского государственного университета

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

³Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), Москва, Россия

*e-mail: vorobjev@pgia.ru

**e-mail: oksana41@mail.ru

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

Поступила в редакцию 25.10.2023 г.

После доработки 28.11.2023 г.

Принята к публикации 25.01.2024 г.

Исследованы геофизические процессы в области дневного полярного каспа 22 декабря 2003 г. при северной ориентации межпланетного магнитного поля (ММП), сравнительно высокой скорости и небольшой плотности солнечного ветра с использованием наземных оптических наблюдений на арх. Шпицберген и данных спутника DMSP F16. Сопоставление спутниковых и наземных наблюдений показывает, что мягкие электронные высыпания в области каспа определяют область аврорального свечения в эмиссии (OI) 630.0 нм. Особенность рассмотренного события состоит в наблюдении яркой лучистой дуги сияния, окаймляющей дневной касп с его полярного края. Проведен анализ результатов наблюдений низколетящего спутника DMSP F16 при пересечении лучистой дуги. Предложены объяснения наблюдаемых явлений, основанные на анализе изменений спектров высыпающихся электронов и формировании продольного пучка электронов продольным электрическим полем.

DOI: 10.31857/S0016794024030028, EDN: SNAKTK

1. ВВЕДЕНИЕ

Дневные полярные каспы как области, через которые плазма солнечного ветра и переходного слоя может проникать на высоты ионосферы, были обнаружены в исследованиях [Heikkila and Winningham, 1971; Frank, 1971]. В течение прошедших десятилетий были проведены многочисленные исследования положения каспа и его характеристик с использованием наблюдений как низковысотных спутников с полярной орбитой [Newell and Meng 1988; Newell et al., 1989; Newell and Meng, 1994], так и спутников на средних и больших высотах вплоть до магнитопаузы [Zhou et al., 2000; Lavraud et al., 2004; Pitout and Bogdanova, 2021].

Наличие одновременно нескольких низковысотных спутников серии DMSP и сравнительно короткий период их обращения вокруг Земли

способствовали частым пересечениям области дневных высыпаний. Это позволило уже к началу 90-х годов прошлого столетия статистическим путем определить основные крупномасштабные характеристики полярного каспа. Спутники DMSP с орбитами, ориентированными примерно в направлении на Солнце, пересекают область каспа в течение 1–2 мин, показывая почти “мгновенные” характеристики высыпающихся частиц. Спутники с более высокими орбитами, такие, как например Polar и Cluster, медленно перемещаясь в пространстве, могут находиться в области каспа существенно более длительное время. Это в различных условиях позволяет исследовать как пространственные, при изменении положения самого каспа, так и временные характеристики геофизических процессов в этой области. Тем не менее, многие процессы формирования плазменной

воронки каспа и его границ исследованы пока ещё сравнительно плохо [Воробьев и др., 2023].

Наблюдения указывают на сильную изменчивость каспа, его характеристики быстро меняются вслед за изменением параметров внешнего воздействия [Pitout and Bogdanova, 2021]. Солнечный ветер обладает высоким уровнем турбулентных флуктуаций со сложными нелинейными связями флуктуирующих параметров. Разумно предположить, что среднестатистические характеристики каспа в естественных условиях наблюдаются крайне редко. В грубом приближении, в каждый текущий момент времени характеристики каспа определяются сложной комбинацией параметров плазмы солнечного ветра и ММП и временем, прошедшим после установления такой комбинации параметров. В этой связи особую значимость приобретают исследования характеристик каспа в режиме отдельных пролетов, отдельных его регистраций, когда характеристики каспических популяций определяются уникальной комбинацией параметров внешнего воздействия. Особый интерес представляют пограничные области каспов там, где диамагнитная область каспа переходит в низкоширотный пограничный слой (LLBL) на экваториальной кромке каспа и в плазменную мантию (MP) на его полярной кромке. Процессы в этих областях в настоящее время почти не исследованы.

Хорошо известно, что после изменения ориентации ММП с южной на северную происходит перестройка магнитной конфигурации магнитосферы, бифуркация плазменного слоя и заполнение магнитосферной плазмой долей хвоста. Такая трансформация магнитосферной топологии приводит к высыпаниям частиц и появлению дуг сияния в полярной шапке, включая формирование тета-авроры (см. обзоры [Hosokawa et al., 2020; Fear, 2021]). Недавние исследования показали, что при северном ММП в долях хвоста наблюдаются анизотропные питч-угловые распределения частиц, характерные для внутренней магнитосферы (см. [Milan et al., 2023] и ссылки в этой работе), что делает возможным для описания продольных токов при ММП $B_z > 0$ использование подходов, применяемых ранее для описания токов зон 1 и 2 (см. ссылки в работе [Kiprichiev et al., 2023]). Но пока не удалось выяснить, как влияют процессы в каспах и на их полярных границах на формирование системы продольных токов при северном ММП.

В настоящей работе проведено исследование каспа при пролете спутника DMSP F16 над арх. Шпицберген при северной ориентации межпланетного магнитного поля. Целью работы является изучение особенностей высыпания частиц

в дневном секторе и сопоставление параметров высыпаний с одновременными оптическими наблюдениями полярных сияний, выполненными на обсерватории Баренцбург. Особенностью рассмотренного события является существование в полуденном секторе при ММП $B_z > 0$ довольно яркой лучистой дуги сияний, окаймляющей с приполюсной стороны высыпания полярного каспа.

2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Данные спутника DMSP F16 и одновременные оптические наблюдения в обсерватории Баренцбург (арх. Шпицберген) 22 декабря 2003 г. использованы для изучения характеристик авроральных высыпаний и полярных сияний в полуденном секторе. Исправленные геомагнитные координаты обсерватории Баренцбург: $\Phi' = 75.2^\circ$, $MLT = UT + 2.6$. Схема наблюдений в географической системе координат показана на рис. 1. Отличительной чертой рассматриваемого периода является наличие яркой лучистой дуги сияния (RA), примерное положение которой в поле зрения камеры всего неба показано на рис. 1 линией со штрихами.

Рис. 1 иллюстрирует положение RA в 09:01:50 UT, что примерно соответствует времени пролета спутника F16 над лучистой дугой сияний. Траектория спутника F16 показана сплошной линией со стрелочкой, которая указывает направление полета. Данные спутника F16 взяты на страницах (<http://sd-www.jhuapl.edu>). Спутник имел почти круговую полярную орбиту с высотой ~ 835 км и периодом обращения ~ 101 мин. Каждую секунду

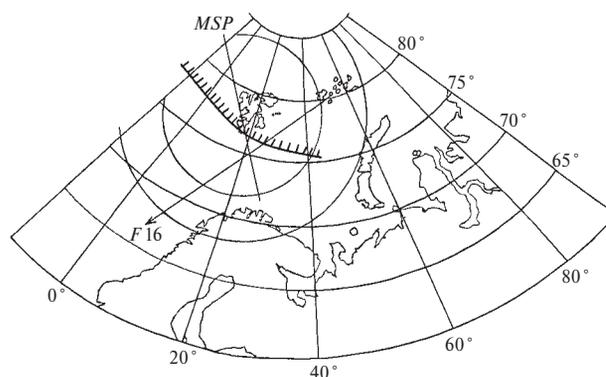


Рис. 1. Схема наблюдений 22 декабря 2003 г. в географической системе координат. Линия со штрихами – лучистая дуга сияния. Сплошная линия со стрелочкой – траектория спутника F16; кругами ограничено поле зрения камеры всего неба на высотах 150 км и 240 км; сплошная линия (MSP) – меридиан регистрации свечения меридиональным сканирующим фотометром.

ду спутник регистрировал спектр высыпавшихся частиц в диапазоне энергий от 32 эВ до 30 кэВ в 19-и каналах, распределенных по энергиям в логарифмической последовательности.

Кругами на рис. 1 ограничено поле зрения камеры всего неба (угол зрения 160°) на высотах 150 км (высота свечения эмиссии 557.7 нм) и 240 км (для эмиссии 630.0 нм). Камера производила непрерывную цифровую регистрацию свечения небосвода в интегральном свете с экспозицией 5 секунд. Сплошной линией, обозначенной MSP, показан геомагнитный меридиан обсерватории, вдоль которого производилась регистрация свечения основных авроральных эмиссий (427.8 нм, 557.7 нм и 630.0 нм) меридиональным сканирующим фотометром (MSP). К сожалению, в рассматриваемый период времени MSP работал не в полном режиме и производил сканирование небосвода длительностью 10 с каждые 2 мин.

На рис. 2 показаны вариации параметров межпланетной среды и уровня магнитной активности в авроральной зоне в коротком интервале време-

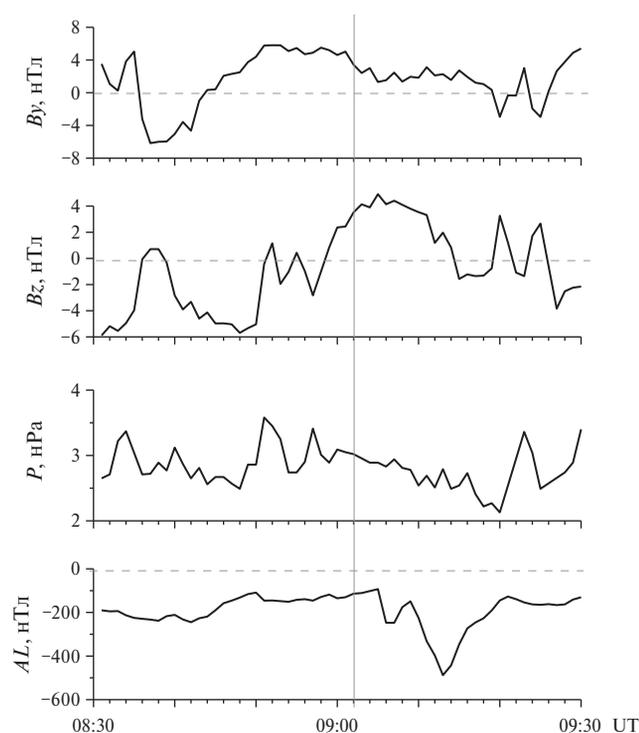


Рис. 2. Вариации параметров межпланетной среды и AL -индекса магнитной активности в интервале 08:30 – 09:30 UT. Сверху вниз показаны: B_y - и B_z -компоненты ММП, динамическое давление солнечного ветра (P , нПа), вариации AL -индекса. Сплошная вертикальная линия – время пересечения спутником области авроральных высыпаний.

ни 08:30 – 09:30 UT, включающем в себя пролет спутника F16. Время пересечения спутником области авроральных высыпаний в дневном секторе отмечено сплошной вертикальной линией. Сверху вниз на рис. 2 показаны B_y - и B_z -компоненты ММП, динамическое давление солнечного ветра (P , нПа) и вариации AL -индекса магнитной активности. Данные по межпланетной среде, приведённые из точки либрации L_1 к магнитосфере Земли, взяты на портале OMNI Web (<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>). Как видно из рисунка, B_y - и B_z -компоненты ММП во время пролета спутника были положительными величиной ~ 3 нТл, скорость, плотность и динамическое давление солнечного ветра менялись незначительно: $V \sim 820$ км/с, $N \sim 4$ см $^{-3}$, $P \sim 3.0$ нПа. Уровень магнитной активности в полуденном секторе авроральной зоны был низким, $AL > -200$ нТл.

3. АНАЛИЗ НАЗЕМНЫХ ОПТИЧЕСКИХ И СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Снимки камеры всего неба, представленные на рис. 3, иллюстрируют положение и динамику дискретных форм дневных сияний. Цифрами в верхней части каждого кадра указано мировое время регистрации сияний. Геомагнитный север находится в верхней части кадра, восток – слева на кадре. Снимок в центральной части верхней панели рисунка в 09:01:50 UT показывает дугу сияний при пролете над ней спутника F16.

В магнито спокойные периоды сияния полуденного сектора обычно характеризуются как слабые лучистые дуги и отдельные лучи, располагающиеся на широтах около 78° исправленной геомагнитной широты (CGL) [Фельдштейн и др., 1966]. Таким образом, довольно яркие лучистые формы сияний, наблюдаемые, как показывает рис. 3, на широтах около 74° CGL, не являются типичными для спокойного периода. Такое явление можно объяснить двумя обстоятельствами. Во-первых, достаточно большая отрицательная B_z -компонента ММП была зарегистрирована примерно за 12 мин до пролета спутника, что могло привести к уменьшению широты сияний. Во-вторых, наблюдения проводились в период небольшого, но достаточно длительного глобального магнитного возмущения, которое началось 20 декабря. Величина индекса SYM/H в максимуме возмущения составляла -35 нТл. Большие скорости и низкая плотность плазмы солнечного ветра позволяют предположить, что источником возмущения являлась корональная дыра. В период пролета спутника величина SYM/H составляла примерно -25 нТл. Умеренно развитый кольцевой ток, как

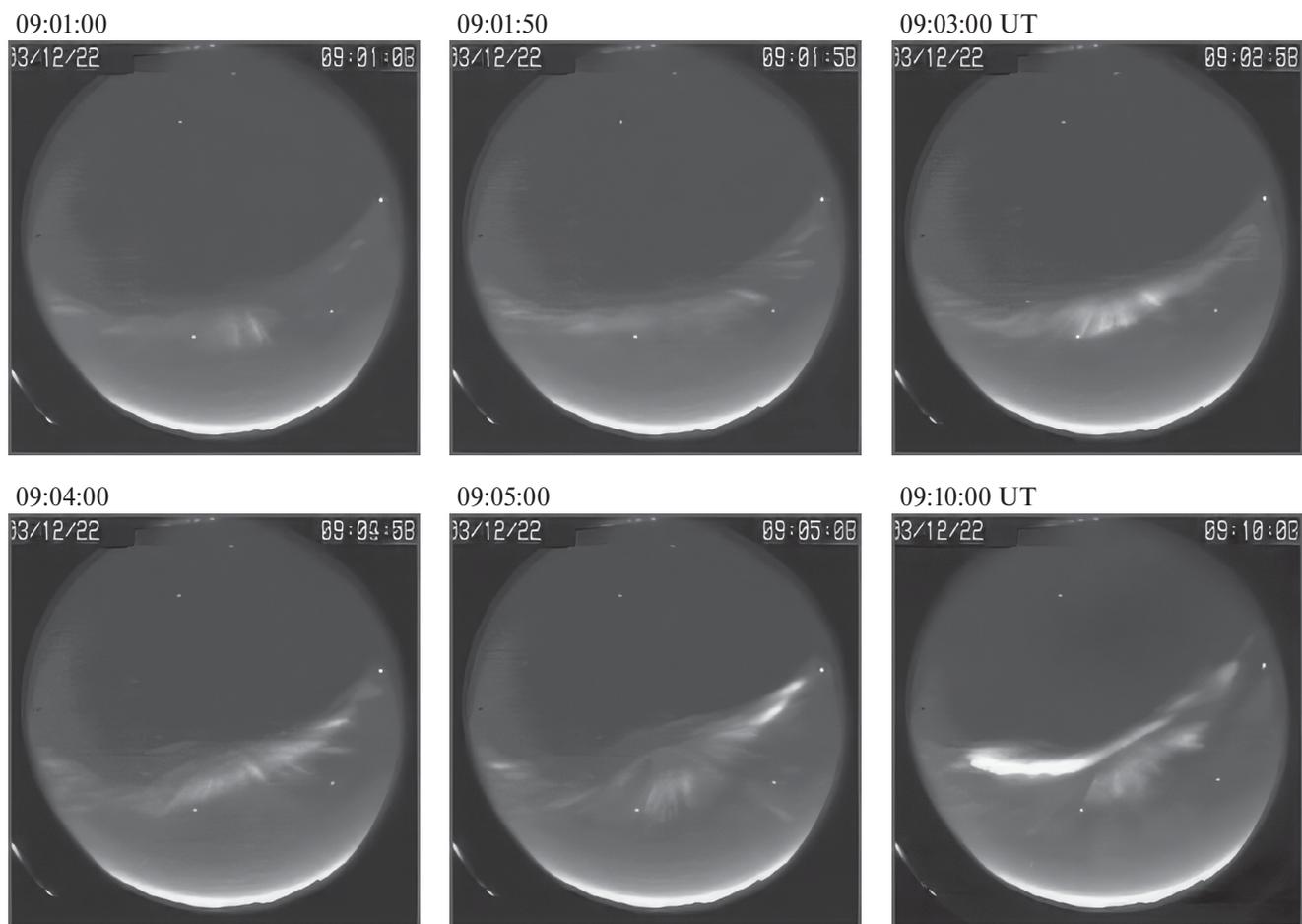


Рис. 3. Снимки камеры всего неба. Цифрами в верхней части каждого кадра указано мировое время. Геомагнитный север в верхней части кадра, восток – слева на кадре.

известно, может быть причиной более низкой широты сияний, а увеличение продольных токов и связанное с ним изменение крупномасштабных электрических полей, возможно, является причиной их значительной яркости.

Интегральные характеристики высыпающих частиц вдоль траектории спутника F16 представлены на рис. 4. На рис. 4а показаны потоки энергии высыпающих ионов (Fi , эВ/см² с ср) и их средние энергии (Ei , кэВ), а на рис. 4б – потоки энергии (Fe) и средние энергии (Ee) высыпающих электронов. По горизонтальной оси на графиках отложена исправленная геомагнитная широта (CGL), которая в проекции вдоль силовых линий на высоту ионосферы определялась по модели AACGM [Baker and Wing, 1989]. Точки на графиках соответствуют значениям параметров, измеренных спутником.

Высыпания полярного каспа идентифицируются при одновременном выполнении следую-

щих условий, сформулированных в работе [Newell and Meng, 1988]:

- средняя энергия: ионов $300 \text{ эВ} < Ei < 3000 \text{ эВ}$, электронов $Ee < 220 \text{ эВ}$;

- поток энергии: ионов $Fi > 10^{10} \text{ эВ/см}^2 \text{ с ср}$, электронов $Fe > 6 \cdot 10^{10} \text{ эВ/см}^2 \text{ с ср}$.

Граничные значения потоков энергии и средних энергий высыпающих частиц, соответствующие этим критериям и определяющие границы каспных высыпаний, показаны на рисунках горизонтальными штриховыми линиями. Экваториальная граница каспа в этом пролете определялась средней энергией высыпающих ионов и потоком энергии высыпающих электронов, а приполюсная граница – средними энергиями ионов и электронов. Идентифицированные таким образом границы каспа указаны вертикальными штриховыми линиями. Экваториальная граница каспа определена на широте 72.8° CGL в 11.9 MLT , а приполюсная – на ши-

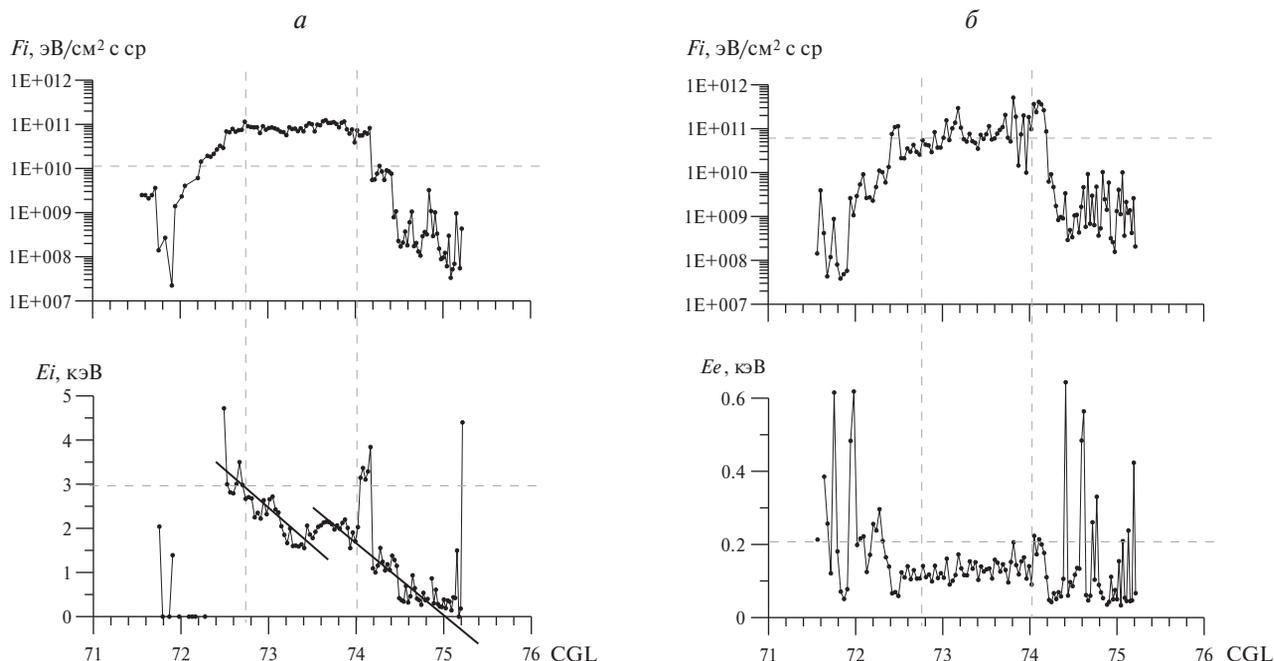


Рис. 4. Интегральные характеристики выпадающих частиц по наблюдениям спутника F16: (а) — потоки энергии выпадающих ионов (F_i , $\text{эВ/см}^2 \text{ с ср}$) и их средние энергии (E_i , кэВ), (б) — потоки энергии (F_e) и средние энергии (E_e) выпадающих электронов. По горизонтальной оси отложена исправленная геомагнитная широта (CGL). Горизонтальные штриховые линии — уровень критериев для определения выпадений каспа; вертикальные штриховые линии — границы каспа.

роте 74.0° CGL в 12.1 MLT. Ширина каспа, зарегистрированного в местный геомагнитный полдень, составляет $\sim 1.2^\circ$ широты.

Потоки энергии выпадающих частиц, но уже в единицах $\text{эрг/см}^2 \text{ с}$, по наблюдениям спутника F16 и регистрации интенсивности аврорального свечения в килоРэлях (I , кР) по наблюдениям MSP в обсерватории Баренцбург показаны на рис. 5.

Сверху вниз на рис. 5 представлены потоки энергии выпадающих ионов (F_i) и электронов (F_e), а ниже интенсивности свечения эмиссии (OI) 630.0 нм (жирная кривая) и (OI) 557.7 нм (тонкая кривая) в 09:01 UT и 09:03 UT. По горизонтальной оси отложена исправленная геомагнитная широта. Для определения широты по величине зенитного угла наблюдения высота свечения принималась равной 150 км для эмиссии 557.7 нм и 240 км для эмиссии 630.0 нм. Вертикальными штриховыми линиями на рисунке показано положение экваториальной и приполюсной границ каспа.

Сопоставление спутниковых и наземных наблюдений показывает, что мягкие электронные выпадения в области каспа определяют область

аврорального свечения в эмиссии 630.0 нм. Интенсивность свечения максимальна в приполюсной части каспа и составляет $\sim 1.0 - 1.5$ кР. Пик интенсивности свечения в эмиссии 557.7 нм определяет широтное положение лучистой дуги сияний и совпадает с пиком в потоках энергии выпадающих электронов. Рисунок 5 показывает, что дуга сияния окаймляет выпадения каспа с его приполюсной стороны и в соответствии с критериями [Newell and Meng, 1988] располагается в самой экваториальной части выпадений полярной мантии. Интенсивность свечения дуги сияний в интервале положительных значений B_z -компоненты ММП не остается постоянной, а существенно изменяется в пределах 0.4–2.0 кР. Непосредственно перед пролетом спутника в 09:01 UT интенсивность эмиссии 557.7 нм в дуге сияния составляла ~ 0.4 кР, а сразу же после пролета в 09:03 UT была уже ~ 1.4 кР.

На рис. 6 представлена градиентная кеограмма сияний в интервалах 08:30–09:00 UT (рис. 6а) и 09:00–09:30 UT (рис. 6б). Кеограмма показывает временное поведение аврорального свечения вдоль геомагнитного меридиана, полученное в интегральном свете по наблюдениям камеры всего неба. По вертикальной оси отложен зенитный

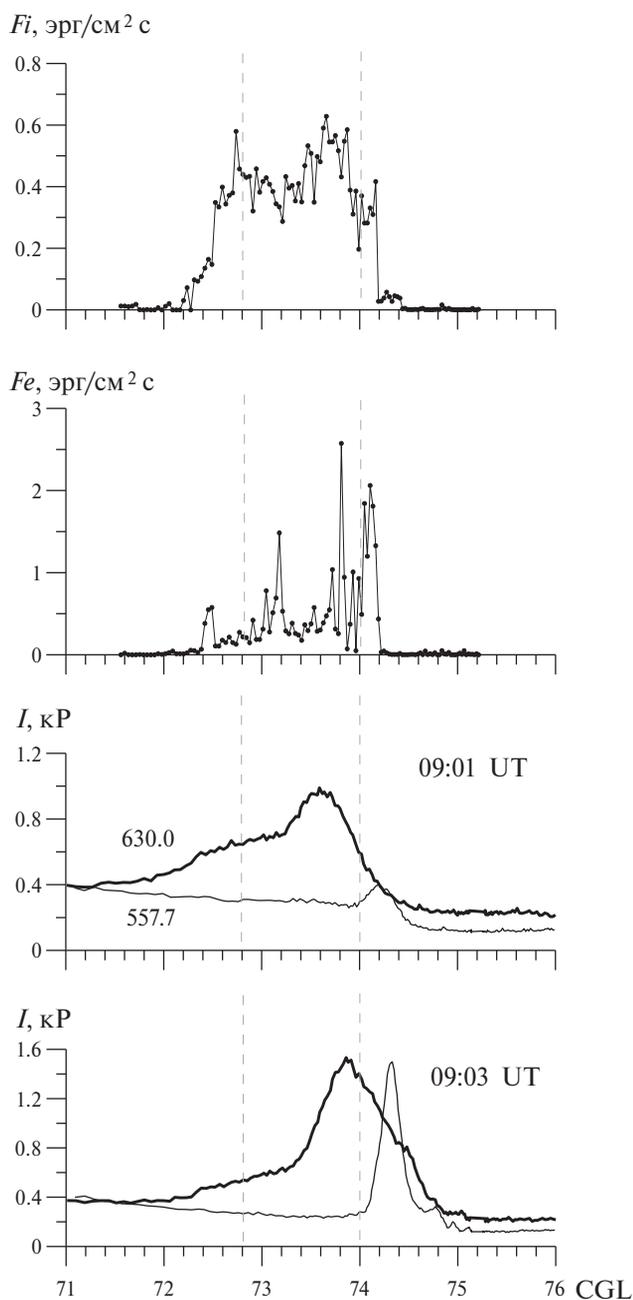


Рис. 5. Характеристики высыпающихся частиц и полярных сияний над арх. Шпицберген.

угол, верх кеограммы соответствует направлению на геомагнитный север. Зенит обсерватории наблюдения находится в центре кеограммы. Градиентная кеограмма выполнена методом, основанным на выделении пространственно-временных и яркостных градиентов, и позволяет выявлять тонкие эффекты в динамике форм сияний и вариациях яркости свечения [Корнилов и Корнилов, 2003].

На рис. 6 горизонтальные линии со стрелками показывают интервал ММП $B_z > 0$. До и после выделенного стрелками интервала дуги сияний двигаются преимущественно к полюсу. Динамика лучистых дуг сияний в эти периоды акцентирована отрезками сплошных линий. Движения дискретных форм сияний к полюсу являются характерными для дневного сектора [Vorobjev et al., 1976], особенно при $B_z < 0$. В интервале $B_z > 0$, как показывает рис. 6, явно выраженного движения сияний к полюсу не наблюдалось.

В долготном направлении лучистая дуга протягивается от восточного до западного горизонта обсерватории, охватывая не менее ± 2 часа MLT от геомагнитного полудня. Яркость свечения в разных участках дуги различная и значительно меняется во времени. На кадре в 09:03:00 UT, показанном в правом верхнем углу рис. 3, наблюдается значительное увеличение яркости в центре изображения дуги. При больших яркостях свечения лучистые структуры сияний трансформируются в однородные дуги и полосы, что можно видеть на рис. 3 в 09:10:00 UT, хотя лучистые структуры продолжают при этом одновременно наблюдаться. Как отмечено в [Козелов и др., 2021], при больших яркостях свечения дискретных форм такая трансформация лучистых сияний в однородные может происходить и в результате ухода камеры в режим насыщения.

В верхней части рис. 7 показаны вариации максимального значения интенсивности эмиссии 557.7 нм ($I_{557.7}$) по наблюдениям MSP в интервале 08:30 – 09:30 UT. Фактически рисунок иллюстрирует изменения интенсивности свечения наиболее яркой дискретной формы сияний на меридиане обсерватории. Из рис. 7 видно, что интенсивность свечения дискретных форм сияний в зеленой линии (OI) меняется от 0.4 кР до 1.8 кР, показывая три ярко выраженных максимума в интервале положительных значений B_z -компоненты ММП. Попытки найти причины таких вариаций в изменениях параметров внешнего воздействия не привели к положительным результатам, так как ни в ММП, ни в параметрах плазмы солнечного ветра таких вариаций не обнаружено. Наблюдается некоторая корреляция между $I_{557.7}$ и уровнем магнитной активности в полуденном секторе авроральной зоны. В нижней части рис. 7 показаны вариации D -компоненты магнитного поля в обсерватории Колледж (Аляска, США) и AL -индекса магнитной активности. В ночном секторе наблюдалось несколько вспышек магнитной активности, в том числе две небольшие магнитосферные суббури интенсивностью в AL -индексе примерно -300 нТл и -500 нТл.

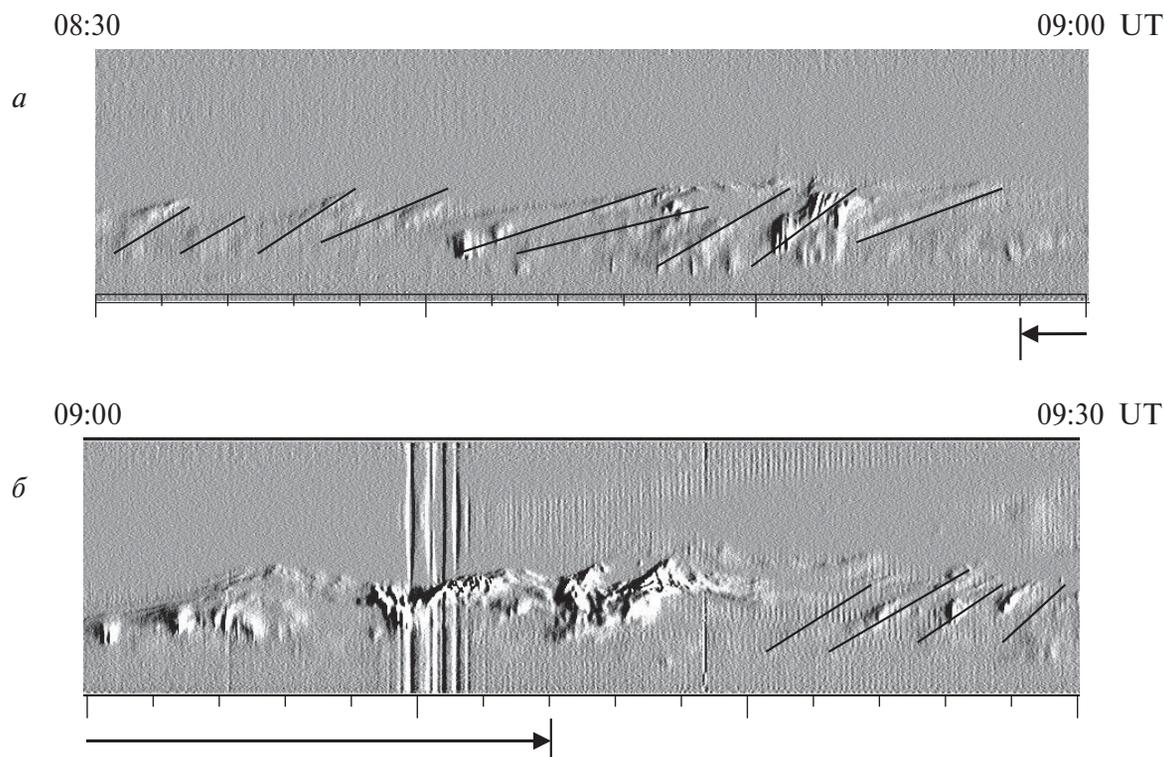


Рис. 6. Кеогаммы сияний в интервалах (а) – 08:30– 09:00 UT и (б) – 09:00 – 09:30 UT. По вертикальной оси отложен зенитный угол, верх кеогаммы соответствует направлению на геомагнитный север. Зенит обсерватории наблюдения в центре кеогаммы. Горизонтальная линия со стрелками – интервал ММП $B_z > 0$.

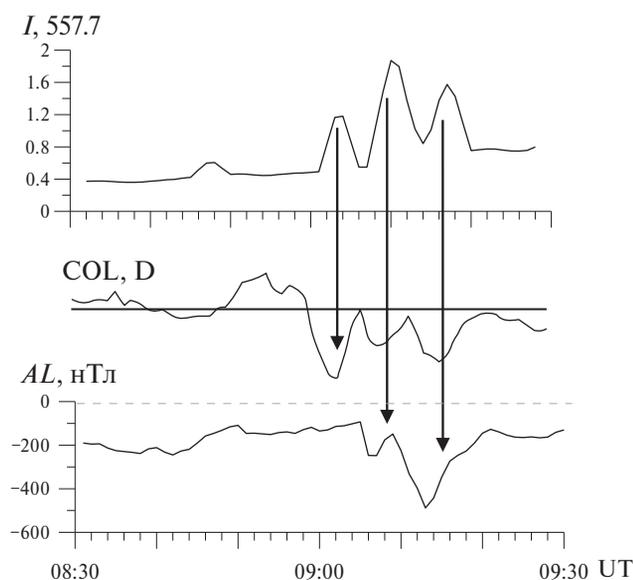


Рис. 7. Вариации максимального значения интенсивности эмиссии 557.7 нм ($I_{557.7}$) по наблюдениям MSP, вариации D -компоненты магнитного поля в обс. Колледж (COL) и AL -индекса магнитной активности.

Возмущение в D -компоненте на обсерватории Колледж, предшествующее этим вариациям, вероятнее всего, связано с суббуревой активностью, протекающей западнее Колледжа, где отсутствуют магнитные станции AL -индекса. Сплошные вертикальные линии со стрелками на рис. 7 нанесены так, чтобы отметить возможную связь между интенсивностью свечения дискретных форм дневных сияний и суббуревой активностью в полуденном секторе. Ниже мы обсудим возможные причины таких вариаций.

Дифференциальные энергетические спектры потока высыпавшихся электронов, полученные спутником перед пересечением и в момент пересечения дневной лучистой дуги, показаны на рис. 8. Можно отметить, что наблюдаемые спектры подобны спектрам высыпавшихся электронов, полученным для ночных лучистых дуг сияний в работе [Дашкевич и др., 2021]. В этой работе спектр электронов рассчитывался путем анализа высотных профилей свечения лучистых дуг сияний, полученных триангуляционными наблюдениями. В отличие от анализируемого события, при этом не было прямых спутниковых

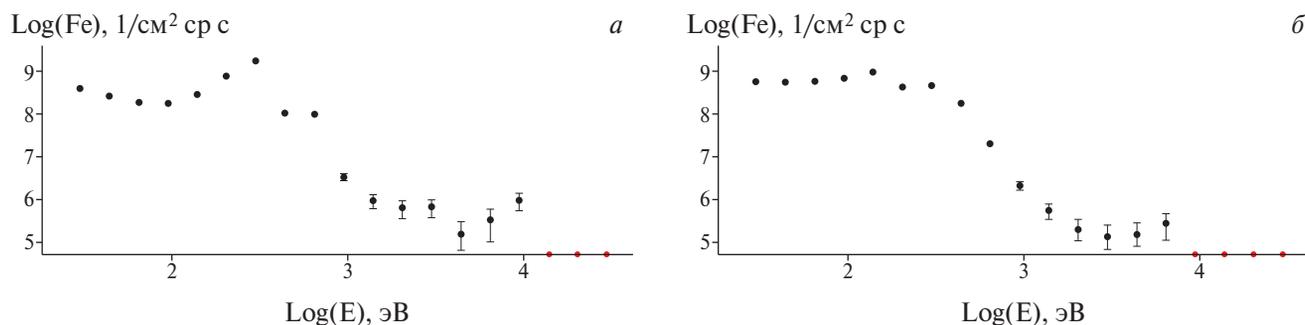


Рис. 8. Спектры высыпающихся электронов в области лучистой дуги сияний, зарегистрированные в (а) 09:01:47 UT – на широте 74.1° CGL и (б) – в 09:01:49 UT на широте 74.0° CGL.

измерений спектров высыпающихся частиц. В спектрах дневных лучистых дуг сияний, зарегистрированных вдоль траектории DMSP F16, наблюдался локальный максимум на энергиях около 0.4 кэВ, но уже в 09:03 UT по данным оптических наблюдений (см. рис. 5 и 8) отношение интенсивностей $I_{630.0}/I_{557.7} < 1$, что свидетельствует об увеличении средней энергии высыпающихся электронов до ~ 1 кэВ.

Пересечение спутником DMSP F16 лучистой дуги позволяет сделать некоторые выводы относительно механизма ускорения электронов в дуге. В пролете спутника над дугой сияния последовательно наблюдались спектры с ярко выраженным максимумом и широкополосные спектры, в которых дифференциальный поток оставался примерно постоянным в достаточно широком энергетическом диапазоне.

На рис. 8а показан дифференциальный энергетический спектр в 09:01:47 UT, а на рис. 8б в 09:01:49 UT. В соответствии с классификацией [Newell et al., 2009] спектр на рис. 8а соответствует полярному сиянию с явно выделяемым максимумом в спектре, которое было названо “моноэнергетическим” полярным сиянием (*monoenergetic aurora*), а спектр на рис. 8б “широкополосному” полярному сиянию (*broadband aurora*). Хорошо известно, что моноэнергетические полярные сияния вызываются ускорением магнитосферных электронов продольным падением электростатического потенциала. По классификации [Newell et al., 2009] широкополосные сияния были названы альвеновскими полярными сияниями. Основанием для такого названия были данные наблюдений на спутнике Fast, на котором холодные в поперечном направлении пучки электронов, имеющие широкий энергетический спектр в продольном направлении, наблюдались одновременно с альвеновскими волнами [Ergun et al., 1998]. К моменту введения такой классификации сияний были развиты теоретические и численные

модели ускорения частиц косыми альвеновскими волнами (см. ссылки в работе [Newell et al., 2009]). Однако коллимированные пучки частиц сами возбуждают широкий спектр волн, включая альвеновские. Поэтому наблюдения широкополосных высыпаний само по себе не указывает однозначно на механизм ускорения частиц альвеновскими волнами. Ниже мы обсудим альтернативный общепринятому механизм ускорения.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

В рассмотренном событии регистрация лучистой дуги сияния на полярном крае каспа при северном ММП ставит ряд вопросов, на которые пока не удастся получить однозначных ответов. Формирование системы продольных токов в околокаспенной области (часто называемой токовой системой 0), содержащей вытекающие и втекающие продольные токи, приводит к существенной перестройке картины магнитосферной конвекции, особенно при северной компоненте ММП. Усредненная система продольных токов по данным системы Iridium приведена на Fig. 5 в работе [Anderson et al., 2008]. В соответствии с этой моделью при ММП $B_z > 0$ и $B_y > 0$ система продольных токов содержит вытекающий ток в области, примерно соответствующей полярной кромке каспа, а к экватору от него втекающий продольный ток.

По данным спутника F16, представленным на портале (<https://dmsp.bc.edu/>), лучистая дуга, регистрируемая в исследуемом нами событии на экваториальной кромке высыпаний полярной мантии, располагается в области вытекающего продольного тока (рисунок не приводится). Втекающий продольный ток был зарегистрирован экваториальнее него в области высыпаний полярного каспа.

Кроме вариаций магнитного поля, спутник F16 измерял скорость конвекции плазмы в на-

правлении перпендикулярном своей траектории. Эти измерения показывают, что в области дуги происходит смена направления конвекции от сильной западной в каспе на более слабую восточную к полюсу от дуги. Рисунок 1 показывает, что лучистая дуга ориентирована под некоторым углом к траектории полета спутника. Тогда в системе координат, связанной с дугой сияния, существует компонента скорости, направленная в северном направлении поперёк дуги сияния. Таким образом, в области каспа конвекция плазмы направлена преимущественно в западном направлении и имеет направленную на север компоненту скорости поперёк лучистой дуги сияния, в то время как к полюсу от дуги в области плазменной мантии конвекция значительно слабее и направлена преимущественно на восток.

Как видно на рис. 4а (нижняя панель), поведение средней энергии высыпавшихся ионов (Ei) с увеличением широты имеет довольно сложный характер. В каспе Ei сначала уменьшается от экваториальной границы каспа к центральной его части, достигая минимальных значений на широте $\sim 73.4^\circ$ CGL, а затем быстро увеличивается на широтах 73.4° – 73.6° CGL. В приполюсной части каспа и в области мантии также наблюдается отчетливо выраженное уменьшение Ei с увеличением широты. Тенденции изменения средней энергии высыпавшихся ионов с увеличением широты показаны на рис. 4а (нижняя панель) отрезками тонких сплошных линий.

Электроны в каспе от его положения в районе магнитопаузы быстро достигают высот атмосферы, где и вызывают авроральное свечение. Ионы намного более медленные, и традиционно считается, что они подвержены $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ дрейфу. Более энергичные ионы в процессе такого дрейфа высыпаются раньше низкоэнергичных, формируя дисперсию энергии по широте. Уменьшение энергии с увеличением широты характерно для отрицательной полярности ММП, в то время как рост Ei характерен для ММП $Bz > 0$. Таким образом, очевидно, что если изменения Ei в рассматриваемом событии рассматривать как дисперсию энергии по широте, тогда дисперсия в экваториальной части каспа, а также в его приполюсной части и в плазменной мантии будет соответствовать направленной к полюсу конвекции плазмы.

Область минимальных значений Ei в каспе примерно совпадает с положением минимума потока энергии высыпавшихся ионов (Fi), который согласно рис. 5 (верхняя панель), находится на широте $\sim 73.2^\circ$ CGL. Давление в каспе определяется, главным образом, ионными высыпаниями

и зависит от их средней энергии и потока энергии [Stepanova et al., 2006]. Из этого следует наличие минимума плазменного давления в центральной части каспа на широтах 73.2° – 73.4° CGL.

Роль градиентов давления в образовании системы продольных токов пока не рассматривалась, но рис. 5, в верхней части которого показан интегральный поток энергии высыпавшихся ионов, явно свидетельствует о существовании таких градиентов как на приполюсной границе, так и внутри каспа. К этому следует добавить, что картина продольных токов не содержит продольных токов меньших масштабов, которые наблюдаются, например, в системе продольных токов аврорального овала.

Изучение продольных токов в магнитосфере показало, что для вытекающих продольных токов характерно ускорение вдоль магнитных силовых линий продольными электрическими полями. Такое ускорение возникает, когда высыпания магнитосферных электронов не могут поддерживать необходимую величину вытекающего продольного тока. На приполюсной границе полярного каспа резко падает концентрация электронов, что в условиях существования продольного тока, вытекающего из ионосферы, создает условия формирования области продольного падения потенциала и формирования спектра электронов с максимумом.

Такой спектр в исследуемом пролете спутника F16 показан на рис. 8а. Существование больших потоков электронов на границе области продольного падения потенциала, согласно [Антонова, 1979, Антонова и др., 2012; Antonova 2002, 2023; Stepanova et al., 2002], может быть связано с проникновением холодной ионосферной плазмы через границу области продольного падения потенциала. Ускоряясь в продольном электростатическом поле, холодные электроны ионосферного происхождения формируют коллимированный электронный пучок, который быстро расплывается вдоль магнитного поля, возбуждая волны в широком частотном диапазоне и формируя спектр с плато по энергии. Вид спектра электронов, измеренный в области пересечения спутником границы между высыпаниями каспа и плазменной мантии, показанный на рис. 8б, соответствует такому сценарию. Данный сценарий является альтернативой теории альвеновского ускорения, которая, с точки зрения авторов, не позволяет объяснить особенности наблюдаемой лучистой дуги. Так, например, не удаётся объяснить длительное существование и стабильность дуги, так как альвеновское ускорение требует существования источника ста-

бильных альвеновских волн в узкой области по поперечной к дуге координате.

Увеличение яркости дуги сияния в полуденном секторе в периоды магнитных суббурь в ночном секторе авроральной зоны можно объяснить быстрым изменением структуры поперечных электрических полей в период начала фазы развития суббури, так как изменение картины конвекции может увеличить скорость дрейфа ионосферной плазмы в область продольного падения потенциала и, соответственно, к увеличению мощности электронного пучка и яркости свечения в дуге.

5. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проанализированы наземные оптические наблюдения на обсерватории Баренцбург (Шпицберген) и одновременные спутниковые наблюдения потоков высыпающихся частиц при положительных значениях B_z -компоненты ММП. Поведение эмиссий (OI) 557.7 нм и (OI) 630.0 нм по данным наземного меридионального сканирующего фотометра (MSP) сопоставлены с характеристиками высыпающихся электронов и ионов, регистрируемых спутником DMSP F16 во время его пролета над арх. Шпицберген через область авроральных высыпаний вблизи местного геомагнитного полудня. Данные спутника F16 позволили определить широтное положение экваториальной и приполюсной границ дневного полярного каспа и форму спектров высыпающихся частиц вдоль траектории спутника.

Показано, что мягкие электронные высыпания в области каспа определяют область аврорального свечения в эмиссии (OI) 630.0 нм. Интенсивность свечения этой эмиссии максимальна в приполюсной части каспа и составляет ~ 1.0–1.5 кР. Потоки энергии высыпающихся электронов в каспе также увеличиваются от его экваториальной границы к приполюсной, в то время как их средние энергии примерно постоянны и находятся на уровне 140 – 160 эВ. Потоки энергии высыпающихся ионов показывают наличие в каспе двух максимумов, одного в приполюсной, а другого в экваториальной его части. Ранее признаки двух максимумов в ионных высыпаниях каспа при северном ММП были обнаружены в работах [Fuselier et al., 2000; Воробьев и Ягодкина, 2022].

На приполюсной границе каспа наблюдаются дифференциальные спектры высыпающихся электронов, имеющие максимум на энергиях около 0.4 кэВ, соответствующие ускорению электро-

нов продольным падением электростатического потенциала. Во время пролета спутника над лучистой дугой сияния наблюдался широкополосный спектр, в котором поток энергии в диапазоне от 30 эВ до ~0.5 кэВ почти не зависел от энергии. Проведенный анализ показал преимущество механизма ускорения холодных электронов продольным падением потенциала и формирования холодного электронного пучка, релаксация которого вызывает формирование наблюдаемого широкополосного спектра.

Оказалось, что интенсивность RA наилучшим образом коррелирует не с параметрами межпланетной среды, а с уровнем магнитной активности в ночном секторе авроральной зоны. Роль активности в ночном секторе в увеличении яркости лучистой дуги сияния можно сравнительно просто объяснить механизмом проникновения ионосферной плазмы в область продольного падения потенциала. Развитие суббури в ночном секторе приводит к быстрому глобальному изменению системы продольных токов и, соответственно, к изменению конфигурации распределения ионосферных электрических полей. Увеличение скорости дрейфа холодной ионосферной плазмы поперек области продольного падения потенциала очевидно увеличит поток холодных ионосферных частиц, ускоряемых в области продольного падения потенциала.

В целом, необходимо отметить, что несмотря на то, что удалось пока проанализировать только одно событие, полученные результаты представляют интерес для выяснения динамики каспа и его полярной границы.

Данные спутника DMSP опубликованы на страницах (<http://sd-www.jhuapl.edu>) и (<https://dmsp.bc.edu/>). Параметры ММП, плазмы солнечного ветра и индексы магнитной активности взяты на страницах (<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>) и (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>).

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа поддержана текущим институтским финансированием. Никаких дополнительных грантов на проведение этого конкретного исследования получено не было.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Антонова Е.Е. Об образовании продольной разности потенциалов, изотропных и коллимированных потоков электронов в вечернем секторе авроральной магнитосферы // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 19. № 6. С. 1064–1069. 1979.
- Антонова Е.Е., И.П. Кирпичев, Рязанцева М.О., Маршин Б.В., Пулинец М.С., Знаткова С.С., Степанова М.В.

- Магнитосферная суббурия и дискретные дуги полярного сияния // Вестн. МГУ. Сер. 3. Физика, астрономия. Т. 67. № 6. С. 31–38. 2012.
- Воробьев В.Г., Ягодкина О.И. Особенности структуры высыпаний дневного полярного каспа при северном межпланетном магнитном поле // Изв. РАН. Сер. физ. Т. 86. № 12. С. 1804–1809. 2022. <https://doi.org/10.31857/S0367676522120304>
- Воробьев В.Г., Ягодкина О.И., Антонова Е.Е., Курпичев И.П. Широтная структура высыпаний в области дневного полярного каспа // Геомагнетизм и аэрoномия. Т. 63. № 6. С. 736–750. 2023. <https://doi.org/10.31857/S0016794023600448>
- Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е., Козелов Б.В. Исследование лучистых структур в полярных сияниях триангуляционными методами 2. Энергетические спектры высыпавшихся электронов // Космич. исслед. Т. 59. № 5. С. 355–360. 2021. <https://doi.org/10.31857/S0023420621050034>
- Козелов Б.В., Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е. Исследование лучистых структур в полярных сияниях триангуляционными методами: 1. Высотный профиль объемной интенсивности свечения // Космич. исслед. Т. 59. № 4. С. 267–274. 2021. <https://doi.org/10.31857/S002342062104>
- Корнилов И.А., Корнилов О.И. Использование методов улучшения изображений для обработки авроральных телевизионных данных // В книге “Техника и методика геофизического эксперимента”. Апатиты. С. 86–91. 2003.
- Фельдштейн Я.И., Шевнина Н.Ф., Лукина Л.В. Сияния в магнитно-спокойные и магнитно-возмущенные периоды // Геомагнетизм и аэрoномия. Т. 6. № 2. С. 312–321. 1966.
- Anderson B.J., Korth H., Waters C.L., Green D.L., Stauning P. Statistical Birkeland current distributions from magnetic field observations by the Iridium constellation // *Annales Geophysicae*. V. 26. No. 3. P. 671–687. 2008. <https://doi.org/10.5194/angeo-26-671-2008>
- Antonova E.E. The results of INTERBALL/Tail observations, the innermagnetosphere substorm onset and particle acceleration // *Adv. Space Res.* V. 30. No. 7. P. 1671–1676. 2002. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(02\)00434-9](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)00434-9)
- Antonova E.E. From physics of polar aurora to changes of the fundamental approaches to the physics of the magnetospheric processes // In *Generation-to-generation communications in space physics*. Ed.
- Borovsky J.E., Grigorenko E.E., Chau J.L., Miyoshi Y., Usanova M., De Nolfo G.A., Greco A., Partamies N. Lausanne: Frontiers Media SA. ISSN 1664-1714, ISBN 978-2-8325-2553-1. June 2023. P. 138–144. 2023. <https://doi.org/10.3389/978-2-8325-2553-1>
- Baker K.B., Wing S. A new magnetic coordinate system for conjugate studies at high latitudes // *J. Geophys. Res.* V. 94. No. A7. P. 9139–9144. 1989. <https://doi.org/10.1029/JA094iA07p09139>
- Ergun R.E., et al. FAST satellite observations of electric field structures in the auroral zone // *Geophys. Res. Lett.* V. 25. No. 12. P. 2025–2028. 1998. <https://doi.org/10.1029/98GL00635>
- Fear R. The northward IMF magnetosphere // In “Magnetospheres in the solar system”. P. 293–309. 2021. <https://doi.org/10.1002/9781119815624.ch19>
- Frank L.A. Plasma in the Earth’s polar magnetosphere // *J. Geophys. Res.* V. 76. No. 22. P. 5202–5219. 1971. <https://doi.org/10.1029/JA076i022p05202>
- Fuselier S.A., Trattner K.J., Petrinec S.M. Cusp observations of high- and low-latitude reconnection for northward interplanetary magnetic field // *J. Geophys. Res.* V. 105. No. A1. P. 253–266. 2000. <https://doi.org/10.1029/1999JA900422>
- Heikkila W.J., Winningham J.D. Penetration of magnetosheath plasma to low altitudes through the dayside magnetospheric cusps // *J. Geophys. Res.* V. 76. No. 4. P. 883–891. 1971. <https://doi.org/10.1029/JA076i004p00883>
- Hosokawa K., Kullen A., Milan S., Reidy J., Zou Y., Frey H., Maggiolo R., Fear R. Aurora in the polar cap: A review // *Space Sci. Rev.* V. 216. No. 1. 2020. <https://doi.org/10.1007/s11214-020-0637-3>
- Kirpichev I.P., Antonova E.E., Stepanova M.V. On the relationship between regions of large-scale field-aligned currents and regions of plateau in plasma pressure observed in the equatorial plane of the Earth’s magnetosphere // *Geophys. Res. Lett.* V. 50. No. 18. e2023GL105190. 2023. <https://doi.org/10.1029/2023GL105190>
- Lavraud B., Fedorov A., Budnik E., Grigoriev A., Cargill P.J., Dunlop M.W. et al. Cluster survey of the high-altitude cusp properties: A three-year statistical study // *Ann. Geophys.* V. 22. No. 8. P. 3009–3019. 2004. <https://doi.org/10.5194/angeo-22-3009-2004>
- Milan S.E., Mooney M.K., Bower G.E., Taylor M.G.G.T., Paxton L.J., Dandouras I., Fazakerley A.N., Carr C.M., Anderson B.J., Vimes S.K. The association of cusp-aligned arcs with plasma in the magnetotail implies a closed magnetosphere // *J. Geophys. Res.* V. 128. No. 7. 2023. <https://doi.org/10.1029/2023JA031419>
- 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. No. 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., Meng C.-I. Ionospheric projections of magnetospheric regions under low and high solar wind pressure conditions // *J. Geophys. Res.* V. 99. No. A1. P. 273–286. 1994. <https://doi.org/10.1029/93JA02273>
- Newell P.T., Sotirelis T., Wing S. Diffuse, monoenergetic, and broadband aurora: The global precipitation budget // *J. Geophys. Res.* V. 114. No. A9. 2009. <https://doi.org/10.1029/2009JA014326>
- Pitout F., Bogdanova Y.V. The polar cusp seen by Cluster // *J. Geophys. Res.* V. 126. No. 9. 2021. <https://doi.org/10.1029/2021JA029582>

- *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. No. 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. No. 8. P. 1631–1636. 2006. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2006.05.013>
- *Vorobjev V.G., Starkov G.V., Feldstein Y.I.* The auroral oval during the substorm development // *Planet. Space Sci.* V. 24. No. 10. P. 955–965. 1976. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(76\)90007-6](https://doi.org/10.1016/0032-0633(76)90007-6)
- *Zhou X.W., Russell C.T., Le G., Fuselier S.A., Scudder J.D.* Solar wind control of the polar cusp at high altitude // *J. Geophys. Res.* V. 105. No. A1. P. 245–252. 2000. <https://doi.org/10.1029/1999JA900412>

Ionospheric Features of Dayside Polar Cusp Precipitation under the Northward IMF

V. G. Vorobjev^{1, *}, O. I. Yagodkina^{1, **}, E. E. Antonova^{2,3, ***}

¹*Polar Geophysical Institute, Apatity, Murmansk Region, Russia*

²*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, Moscow, Russia*

³*Space Research Institute Russian Academy of Science, Moscow, Russia*

**e-mail: vorobjev@pgia.ru*

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

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

The geophysical processes in the dayside polar cusp on December 22, 2003 under the northern orientation of the interplanetary magnetic field (IMF), relatively high speed and low density of the solar wind by using the ground-based optical observations on Spitsbergen and DMSP F16 spacecraft observations were examined. A comparison of spacecraft and ground-based observations shows that soft electron precipitation in the cusp region determine the region of the auroral luminosity in the (OI) 630.0 nm emission. The peculiarity of the event under consideration is the observation of a bright rayed auroral arc bordering the dayside cusp from its polar edge. The results of observations of the low-altitude DMSP F16 spacecraft during its pass over the rayed arc were analyzed. Explanations of the observed phenomena are proposed based on the analysis of changes in the spectra of precipitating electrons and the formation of an electron beam by a field-aligned electric field.