

DOI: 10.51981/2588-0039.2023.46.014

ПОЛЯРНЫЕ СИЯНИЯ И АВРОРАЛЬНЫЕ ВЫСЫПАНИЯ В ОБЛАСТИ ДНЕВНОГО ПОЛЯНОГО КАСПА ПРИ СЕВЕРНОМ ММП

В.Г. Воробьев¹, О.И. Ягодкина¹, Е.Е. Антонова^{2,3}

¹Полярный геофизический институт. г. Апатиты (Мурманская обл.)

²Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, г. Москва

³Институт космических исследований, г. Москва

Аннотация

Проведен анализ наземных оптически наблюдений на обс. Баренцбург (арх. Шпицберген) 22 декабря 2003 г. в период регистрации спутником DMSP F16 дневного полярного каспа. Характеристики высыпающихся частиц, наблюдаемые спутником F16, позволили определить широтное положение приполюсной и экваториальной границ каспа и широтную структуру авроральных высыпаний в полуденном секторе. Данные OMNI Web показывают, что Vz-компонента ММП повернулась на север примерно за 12 мин до пролета спутника и оставалась северной примерно в течение 30 мин. Наземные оптические наблюдения показывают, что ионосферная проекция дневного каспа совпадает с областью свечения в эмиссии 630.0 нм с максимумом интенсивности в приполюсной части каспа. С приполюсной стороны касп окаймляет лучистая дуга (RA), положение которой совпадает с максимумом потока энергии электронных высыпаний. Средняя энергия высыпающихся электронов в каспе составляла ~ 0.13 кэВ, а в RA ~ 0.24 keV со спектральным пиком на энергиях около 0.4 кэВ. Яркость RA при северной ориентации ММП изменялась в пределах 1-2 кР в хорошем соответствии с вариациями AL-индекса магнитной активности.

1. Введение

Дневные полярные каспы, как области, через которые плазма солнечного ветра и переходного слоя может проникать на высоты ионосферы, были обнаружены в исследованиях, относящихся к 70-ым годам прошлого столетия. В течение прошедших десятилетий были проведены дополнительные многочисленные исследования положения каспа и его характеристик с использованием наблюдений как низковысотных спутников с полярной орбитой, так и спутников на средних и больших высотах вплоть до магнитопаузы.

Быстрые орбиты и наличие одновременно нескольких низковысотных спутников серии DMSP способствовали частым пересечениям области дневных высыпаний. Это позволило уже к началу 90-х годов прошлого столетия статистическим путем определить основные крупномасштабные характеристики каспа [Newell and Meng, 1988; Newell et al., 1989]. Спутники DMSP 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. Эти 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 важность приобретают исследования характеристик каспа в режиме отдельных пролетов, отдельных его регистраций, когда характеристики каспальных популяций определяются уникальной комбинацией параметров внешнего воздействия.

В настоящей работе проведено исследование каспа в пролете спутника DMSP F16 над арх. Шпицберген при северной ориентации межпланетного магнитного поля (ММП). 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 $V_z > 0$ 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 линией со штрихами. Рисунок 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. Кругами на рис. 1 ограничено поле зрения камеры всего неба на высотах 150 км (для эмиссии 557.7 нм) и 240 км (для эмиссии 630.0 нм). Сплошной линией, обозначенной MSP, показан геомагнитный меридиан обсерватории, вдоль которого производилась регистрация свечения основных авроральных эмиссий 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.

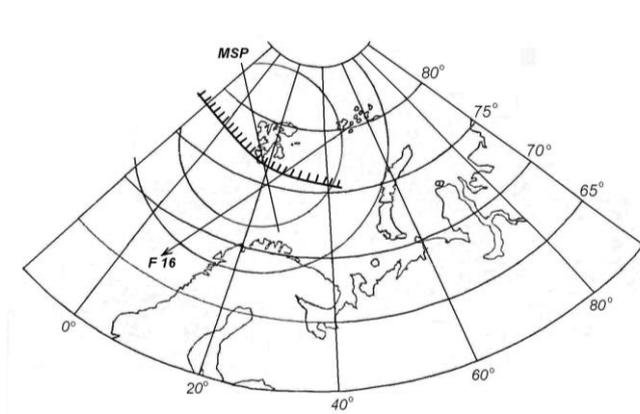


Рисунок 1. Схема проведения наблюдений.

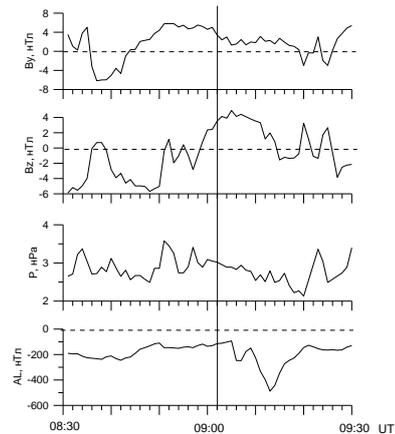


Рисунок 2. Вариации V_x и V_z - компонент ММП, динамического давления (P) и AL-индекса.

На рис. 2 показаны вариации параметров межпланетной среды и уровня магнитной активности в авроральной зоне в коротком интервале времени 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 V_x и V_z компоненты ММП, динамическое давление солнечного ветра (P, нПа) и вариации AL индекса магнитной активности. Как видно из рисунка, V_x и V_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 низки $AL > -200$ 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 09:01:50 UT показывает дугу сияний в период пролета над ней спутника F16.

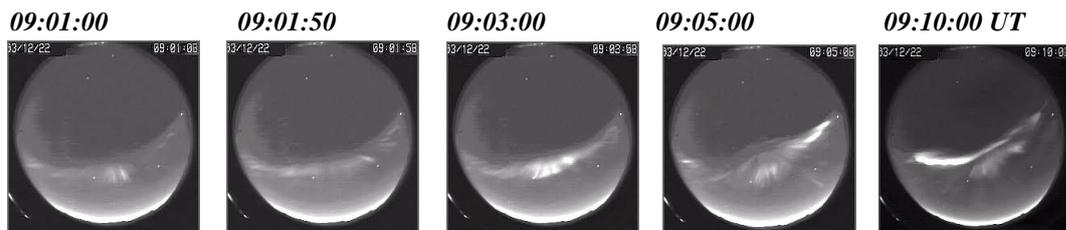


Рисунок 3. Снимки камеры всего неба с экспозицией 5 секунд.

В магнитоспокойные периоды сияния полуденного сектора обычно характеризуются как слабые лучистые дуги и отдельные лучи, располагающиеся на широтах около 78° CGL [Feldstein et al., 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 V_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 фазы восстановления небольшой, но достаточно длительной магнитной бури, начавшейся 20 декабря с интенсивностью в максимуме $SUM/H = -35$ нТл. Большие скорости и низкая плотность плазмы солнечного ветра позволяют предположить, что источником магнитной бури являлась корональная дыра. В период пролета спутника величина SUM/H составляла ~ -25 нТл. Наличие достаточно интенсивного кольцевого тока может быть дополнительной причиной низкой широты сияний, а, возможно, и их значительной яркости.

Интегральные характеристики высыпающихся частиц по данным F16 позволяют вдоль траектории спутника определить области высыпаний из различных источников. Высыпания полярного каспа идентифицируются при одновременном выполнении следующих 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 $Fe > 6 \cdot 10^{10} \text{ эВ/см}^2 \text{ с ср}$.

Потоки энергии высыпающихся частиц по наблюдениям спутника F16 и регистрации интенсивности аврорального свечения в килоРэлеях (I , кР) по наблюдениям MSP в обсерватории Баренцбург показаны на рис. 4. Сверху вниз на рис. 4 представлены потоки энергии высыпающихся ионов и электронов (Fi , Fe , $\text{эрг/см}^2 \text{ с}$), а ниже интенсивности свечения эмиссий (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.

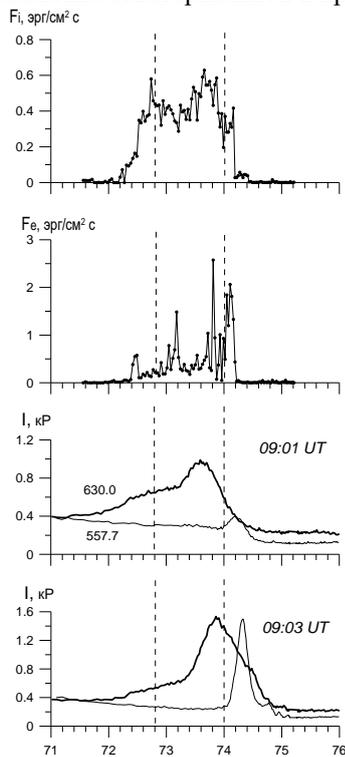


Рисунок 4. Данные F16 и MSP.

выраженных максимума в интервале положительных значений V_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 высокая корреляция между $I_{557.7}$ и уровнем магнитной активности в полуночном секторе авроральной зоны. В ночном секторе наблюдалось несколько вспышек магнитной активности в том числе две небольшие магнитосферные суббури. Наблюдается тесная связь между интенсивностью свечения дискретных форм дневных сияний и суббуревой активностью в полуночном секторе.

Дифференциальный энергетический спектр потока высыпающихся электронов, полученный спутником в дневной дуге сияния, подобен спектру высыпающихся электронов, полученному для ночных лучистых дугах сияний в работе [Дашкевич и др., 2021]. Спектр может быть аппроксимирован суммой двух функций, одна из

Сопоставление спутниковых и наземных наблюдений показывает, что мягкие электронные высыпания 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 высыпающихся электронов. Рисунок показывает, что дуга сияния окаймляет высыпания каспа с его приполюсной стороны и в соответствие с критериями [Newell and Meng, 1988] располагается в самой экваториальной части высыпаний полярной мантии. Интенсивность свечения дуги сияний в интервале положительных значений V_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.

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. При больших яркостях свечения лучистые структуры сияний трансформируются в однородные дуги и полосы, что можно видеть на рис. 3 в 09:10:00 UT. Вариации максимального значения интенсивности эмиссии 557.7 нм ($I_{557.7}$) по наблюдениям MSP фактически иллюстрирует изменения интенсивности свечения наиболее яркой дискретной формы сияний на меридиане обсерватории. Интенсивность свечения дискретных форм сияний в зеленой линии (OI) менялась от 0.4 кР до 1.8 кР, показывая три ярко

которых носит степенной характер на малых энергиях, а другая – максвелловское распределение по энергиям. В спектре дневной дуги наблюдается локальный максимум на энергиях около 400 эВ, но уже в 09:03 UT отношение интенсивностей $I_{630.0}/I_{557.7} < 1$, что свидетельствует об увеличении средней энергии высыпающихся электронов до ~ 1 кэВ.

Изучение продольных токов в магнитосфере показывает, что для вытекающих продольных токов характерно ускорение вдоль магнитных силовых линий продольными электрическими полями. Такое ускорение возникает, когда изотропное высыпание магнитосферных электронов не может поддерживать необходимую величину вытекающего 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.

На рис. 5 представлены спектры высыпающихся электронов, зарегистрированные в 09:01:47 UT (а) и в 09:01:49 UT (б) в области лучистой дуги сияния. Существование больших потоков электронов (рис. 5а), согласно [Антонова, 1979; Antonova, 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 (рис. 5б).

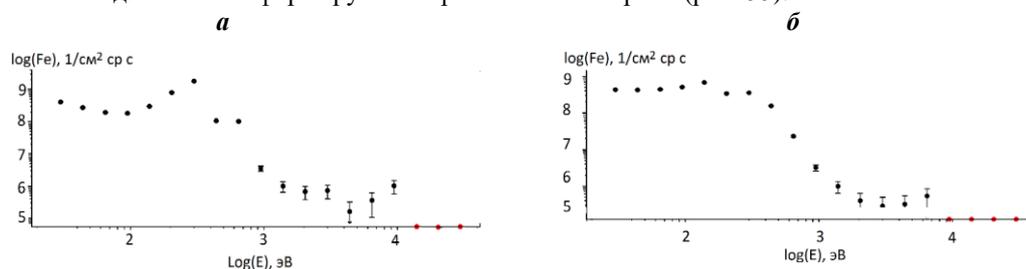


Рисунок 5. Спектр высыпающихся электронов в лучистой дуге сияния (а) и к экватору от дуги (б).

4. Заключение

Проанализированы наземные оптические наблюдения на обсерватории Баренцбург и одновременные наблюдения спутником DMSP F16 потоков высыпающихся частиц при положительных значениях V_z компоненты ММП 22 декабря 2003 года. Исследовано поведение эмиссий 557.7 и 630.0 нм и характеристик потоков энергии и средних энергий высыпающихся ионов и электронов, регистрируемых спутником F16 во время пролета через дневной полярный касп. Данные F16 по потокам энергии и энергии электронов и ионов позволили определить широтное положение экваториальной и приполюсной границ каспа вблизи геомагнитного полудня. Согласно данным OMNI Web, компонента V_z повернулась на север примерно за 12 минут до пересечения спутником границ каспа и сохраняла направление на север примерно в течение 30 минут. Оптические наблюдения в районе каспа продемонстрировали плавное изменение светимости в эмиссии 630.0 нм с максимумом ~ 1 кР в приполюсной части каспа. С приполюсной стороны касп окаймляла довольно яркая лучистая дуга сияний. Яркость лучистой дуги (RA) в эмиссии 557.7 нм во время положительной ориентации V_z компоненты ММП изменялась примерно от 1 до 2 кР и её вариации хорошо коррелирует с AL индексом магнитной активности. Поскольку в рассматриваемом случае при $V_z > 0$ дуга фиксируется на полюсном крае каспа или, возможно, в экваториальной части высыпаний мантии, остается открытым вопрос об источнике этой дуги.

Данные спутника DMSP F16 взяты на страницах спутника DMSP F16 <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/>.

Литература

- Антонова Е.Е. Об образовании продольной разности потенциалов, изотропных и коллимированных потоков электронов в вечернем секторе авроральной магнитосферы // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 19. № 6. С. 1064–1069. 1979.
- Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е., Козелов Б.В. Исследование лучистых структур в полярных сияниях триангуляционными методами. 2. Энергетические спектры высыпающихся электронов // Космические исследования. Т. 59. № 5. С. 355–360. 2021.
- 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.
- Feldstein Ya.I., Shevnina N.F., Lukina L.V. Aurora during magneto-disturbed and magneto-quiet periods // Geom. Aeron. V. 6. No. 2. P. 312–321. 1966 (in Russian).
- 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.
- 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>
- 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>