УДК 550.338.1

# ДАВЛЕНИЕ ИОНОВ В ОБЛАСТИ ВЫСЫПАНИЙ ДНЕВНОГО НИЗКО-ШИРОТНОГО ГРАНИЧНОГО СЛОЯ

© 2021 г. В. Г. Воробьев<sup>1,</sup> \*, О. И. Ягодкина<sup>1</sup>, Е. Е. Антонова<sup>2, 3</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия

 $^{2}\Phi$ едеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

"Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова",

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, Москва, Россия

<sup>3</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт космических исследований Российской академии наук, Москва, Россия

\**E-mail: vorobjev@pgia.ru* 

Поступила в редакцию 25.09.2020 г. После доработки 20.10.2020 г. Принята к публикации 27.11.2020 г.

По данным спутников DMSP F6 и F7 показано, что в магнитоспокойные периоды давление ионов в области ионосферной проекции низкоширотного граничного слоя не зависит от  $B_z$  компоненты межпланетного магнитного поля, но быстро увеличивается с ростом динамического давления солнечного ветра. Обнаружено локальное увеличение ионного давления в полуденном секторе и обсуждается возможное его проявление в интенсивности высокоширотных дневных полярных сияний.

DOI: 10.31857/S0367676521030315

#### **ВВЕДЕНИЕ**

На дневной стороне область мягких высыпаний создается частицами различных типов. Определение области магнитосферного источника различных типов высыпаний проводится путем сравнения средних энергий и потоков энергии частиц, наблюдаемых на низкоорбитальных спутниках, с характеристиками частиц на больших высотах. По положению области магнитосферного источника в [1] были определены высыпания, характерные для плазменной мантии, полярного каспа и низкоширотного граничного слоя. В этих пограничных слоях дневной магнитопаузы наиболее интенсивно протекают процессы, связанные с взаимодействием магнитосферы с солнечным ветром и передачей энергии солнечного ветра в магнитосферу Земли.

Скорость солнечного ветра меняется в небольших пределах, поэтому его динамическое давление ( $P_{sw}$ ) определяется, главным образом, плотностью плазмы. Характеристики частиц в различных областях вторжений дневного сектора в зависимости от плотности плазмы солнечного ветра исследовались в работе [2]. По данным спутников DMSP F6 и F7 было показано, что с ростом плотности плазмы солнечного ветра наблюдается значительное увеличение потоков высыпающихся ионов во всех областях дневных высыпаний. Однако в зоне структурированных высыпаний аврорального овала и в зоне мягких диффузных высыпаний одновременно с ростом потоков наблюдается уменьшение средней энергии высыпающихся ионов. Давление плазмы, определяемое как потоками высыпающихся частиц, так и их средней энергией, в дневном секторе до настоящего времени не исследовалось. В ночном секторе, как показывают результаты работы [3], давление плазмы на границах авроральных высыпаний почти линейно возрастает с ростом  $P_{sw}$ .

Ранее в [4, 5] была обнаружена тесная связь поведения дневных авроральных высыпаний с  $B_z$  компонентой межпланетного магнитного поля (ММП). Было показано, что уменьшение (увеличение)  $B_z$  сопровождается смещением овала сияний в более низкие (высокие) широты. Отмечена высокая корреляция между вариациями  $B_z$  и изменениями положения дневного полярного каспа.

Целью настоящей работы является определение ионного давления в области ионосферной проекции низкоширотного граничного слоя и изучение влияния *B*<sub>z</sub> компоненты ММП и дина-



**Рис. 1.** Давление ионов в области высыпаний LLBL: при разных значениях  $B_z$  компоненты ММП (*a*); в зависимости от динамического давления солнечного ветра ( $\delta$ ); распределение давления по МLT при фиксированных уровнях  $P_{sw}$  (1.0, 2.0 ... 6.0 нПа) ( $\theta$ ).

мического давления солнечного ветра на уровень давления плазмы.

# ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

В работе использованы данные спутников DMSP F6 и F7 за 1986 г. Для определения положения границ авроральных высыпаний и времени их регистрации использовались данные автоматизированной системы обработки, представленные на портале http://sd-www.jhuapl.edu/Aurora/ dataset\_list.html.

Методика определения ионного давления по измерениям спутников серии DMSP, использованная в настоящем исследовании, изложена в работе [6]. Определялись средние потоки и энергии ионов между соседними границами различных зон высыпаний, на основании которых рассчитывалась величина ионного давления. Чтобы избежать процессов, связанных с развитием магнитосферных возмущений, рассматривались данные спутников только при низком уровне магнитной активности AL > -200 нТл.

# ДАВЛЕНИЕ ИОНОВ В ОБЛАСТИ ВЫСЫПАНИЙ LLBL

Низкоширотный граничный слой (LLBL – low-latitude boundary layer) является граничной областью дневной магнитосферы, в которой регистрируются частицы, как магнитослоя (magnetosheath), так и частицы магнитосферного происхождения. Поток энергии высыпающихся ионов в LLBL ~ $10^9$  (эB/см<sup>2</sup> · с · ст), а средняя энергия ионов ~3-6 кэВ.

Результаты исследования ионного давления представлены на рис. 1. Так как характеристики плазмы в граничном слое магнитосферы могут существенно зависеть от угла между направлением на Солнце и нормалью к магнитопаузе, для исследований был выбран узкий интервал местного геомагнитного времени, 11:00–13:00 MLT. В этом

интервале при низком уровне магнитной активности, при наличии данных о параметрах солнечного ветра и ММП было обнаружено 262 пролета спутников, в которых регистрировались высыпания граничного слоя.

Рисунок 1*а* показывает, что давление в области высыпаний LLBL ( $P_L$ ) не зависит от  $B_z$  компоненты ММП. Средний уровень давления ( $P_L$ ) = 0.27 ± ± 0.07 нПа. Зависимость  $P_L$  от динамического давления солнечного ветра иллюстрирует рис. 1*б*. Как видно на рисунке, давление ионов существенно увеличивается с ростом Psw. Сплошная линия на рисунке соответствует уравнению линейной регрессии, коэффициент корреляции по всем точкам массива данных r = 0.61, стандартная ошибка уравнения регрессии 0.18.

Рисунок 1в иллюстрирует распределение давления в высыпаниях граничного слоя по MLT при фиксированных уровнях динамического давления солнечного ветра от 1.0 до 6.0 нПа. Точки на графиках соответствуют уравнениям регрессии, которые были получены для всех, показанных на рисунке, секторов MLT. Данные в 12:00 MLT соответствуют уравнению регрессии для сектора 11:00-13:00 MLT. Чтобы избежать влияния весовых показателей, данные усреднялись в каждом интервале *P*<sub>sw</sub> по 1 нПа. В результате было получено уравнение регрессии:  $P_L = 0.10$  Psw + 0.06 (с коэффициентом корреляции r = 0.90). Затем аналогичные линейные уравнения  $P_L = P_L(P_{sw})$  были получены для всех 2 часовых интервалов MLT со сдвигом на 1 час в восточном и западном направлениях. Рис. 1в демонстрирует ярко выраженное локальное увеличение ионного давления в полуденном секторе, величина которого растет с увеличением  $P_{sw}$  При  $P_{sw} = 6$  нПа величина пика  $P_L$ примерно в два раза превышает уровень давления в соседних секторах MLT, что существенно выше величины стандартного среднеквадратичного отклонения, типичные значения которого составляют ~0.1 нПа.



**Рис. 2.** Вариации динамического давления солнечного ветра (верхняя панель) и *AL* индекса магнитной активности (нижняя панель) 24 ноября 1997 г. в интервале 06:00–09:00 UT. Вертикальные штриховые линии указывают интервал наблюдений спутника POLAR, представленных на рис. 3.

В магнитослое, когда плазма солнечного ветра перемещается от фронта ударной волны в сторону магнитопаузы, ее скорость уменьшается, но увеличиваются флуктуации магнитного поля, амплитуда которых в подсолнечной области может превышать величину магнитного поля около магнитопаузы [7]. Это, по-видимому, создает в полуденные часы локальную область с наиболее благоприятными условиями для проникновения плазмы в магнитосферу. При удалении от этой области увеличивается угол между вектором скорости солнечного ветра и нормалью к магнитопаузе и уменьшается динамическое давление плазмы магнитослоя на магнитопаузу [8, рис. 2]. Плазма в пограничном слое течет в сторону флангов магнитосферы, что приводит к уменьшению давления в погранслое.

В дневной высокоширотной области типичным проявлением геомагнитной активности являются неструктурированные осцилляции в диапазоне периодов Pc1-2. В ряде исследований LLBL рассматривается как область источника пульсаций Pc1. Общепринято, что Pc1 генерируются вследствие развития электромагнитной ионно-циклотронной неустойчивости (ЭИЦН) в экваториальной плоскости магнитосферы. Сжатие магнитосферы динамическим давлением солнечного ветра приводит к увеличению анизотропии плазмы и, как результат, к росту ЭИЦН и электромагнитной электронно-циклотронной (ЭЭЦН) неустойчивости. Рассеяние частии ЭИШ и ЭЭШ волнами может способствовать появлению как протонных, так и электронных полярных сияний. В соответствии с результатами, представленными выше на рис. 1*в*, в высокоширотной ионосфере можно ожидать появления "пятна" свечения, соответствующего ионосферной проекции области генерации неустойчивостей в экваториальной плоскости. Размеры такого "пятна" свечения могут составлять  $\sim 2^{\circ}-3^{\circ}$  широты [9, рис. 1] и 2–3 ч по долготе (рис. 1*в*) на исправленных геомагнитных широтах около 78° CGL.

Исследования характеристик электронных высыпаний в секторе 11:00-13:00 МLТ показывают, что с ростом  $P_{sw}$  от 1.0 до 5.0 нПа поток энергии высыпающихся электронов увеличивается от 0.2 до 0.5 эрг/см<sup>2</sup> · с (рис. не приводится). Это соответствует увеличению интенсивности свечения полосы LBH (170.0 нм) от 25 R до 70 R, а эмиссии 557.7 нм от 0.15 kR до 0.4 kR. При  $P_{sw} = 5.0$  нПа средние пиковые значения потока составляют ~2.0 эрг/см<sup>2</sup> с, интенсивность свечения LBH ~260 R, а в эмиссии 557.7 нм ~1.5 kR.

В работе [10] показано поведение дневных сияний в период резкого увеличения динамического давления солнечного ветра 18 марта 2002 г. Представленные в работе снимки высокоапогейного спутника IMAGE указывают на то, что резкое увеличение Psw сопровождалось появлением в полуденном секторе яркого "пятна" свечения как в протонных, так и в электронных сияниях. Условия развития ЭИЦН и ЭЭЦН разные, поэтому возможны существенные различия пространственно-временных характеристик протонных и электронных высыпаний/полярных сияний. Связь электронных дневных сияний с динамическим давлением солнечного ветра исследовалась в [11]. Рассмотренные в этой работе события показывают, что при В<sub>z</sub> ММП > 0 как короткопериодные (15-20 мин), так и длиннопериодные (1-3 ч) вариации P<sub>sw</sub> сопровождались увеличениями интенсивности сияний в полосе дневного красного свечения.

В отличии от [10], ниже мы рассмотрим пример поведения сияний в период плавного роста  $P_{sw}$ , наблюдаемого 24 ноября 1997 г. В рассмотренном событии  $P_{sw}$  изменялось от ~1.0 нПа в 07:00 UT до ~5.0 нПа в 07:45 UT. Вариации  $P_{sw}$  и уровень магнитной активности в авроральной зоне в интервале 06:00–09:00 UT иллюстрирует рис. 2. Рассмотренное событие происходило в период очень низкой магнитной активности AL > -100 нТл. Глобальные снимки сияний, выполненные спутником POLAR в УФ области спектра (LBH, 170.0 нм), представлены на рис. 3. Временной интервал, соответствующий интервалу наблюдений POLAR, выделен вертикальными штриховыми линиями на рис. 2.

При спокойных условиях и низком динамическом давлении солнечного ветра авроральное свечения в дневном секторе не регистрируется (рис. 3*a*). С ростом  $P_{sw}$  в послеполуденном секторе (~13–15 MLT) на широте ~78° CGL формируется пятно свечения (рис. 3*b*), площадь и яркость которого увеличиваются с ростом  $P_{sw}$  (рис. 3*b*, 3*c*). В 07:24 UT (рис. 3*c*) яркость свечения достигает



**Рис. 3.** Глобальные снимки сияний спутника POLAR в ультрафиолетовой области спектра, выполненные в 07:16 UT (*a*), 07:18 UT (*b*), 07:20 UT (*b*), 07:24 UT (*c*), 07:40 UT (*b*). На снимки нанесена сетка исправленных геомагнитных координат. Вертикальная линия — меридиан полдень—полночь; верх — полдень, справа — утро. Шкала интенсивности свечения в нижней части рисунка.

~250 R. "Пятно" свечения сохраняется в течение всего периода роста  $P_{sw}$ . Появление полос диффузного свечения в утреннем и вечернем секторах при уровне динамического давления 4—5 нПа соответствует характерным признакам поведения сияний после внезапных импульсов динамического давления, SI, и внезапных начал бури, SSC, (см. [10] и ссылки там).

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были использованы данные спутников F6 и F7 для изучения ионного давления в области ионосферной проекции низкоширотного граничного слоя (LLBL). Исследовано влияние  $B_z$  компоненты ММП и динамического давления солнечно-го ветра ( $P_{sw}$ ) на уровень давления плазмы при низком уровне магнитной активности (AL > -200 нТл). Основные полученные результаты:

 Давление ионов в области высыпаний LLBL не зависит ни от полярности, ни от величины вертикальной компоненты ММП.

2. С ростом  $P_{sw}$  уровень ионного давления существенно увеличивается от ~0.15 нПа при  $P_{sw} = 1.0$  нПа до ~0.65 нПа при  $P_{sw} = 6.0$  нПа. Средний уровень давления составляет  $\langle P_L \rangle = 0.27 \pm \pm 0.07$  нПа.

3. Распределение ионного давления по MLT демонстрирует ярко выраженное локальное увеличение давления в полуденном секторе (~11–14 MLT), величина которого растет с увеличением  $P_{sw}$ . При  $P_{sw} = 6$  нПа величина пика  $P_L$  примерно в два раза превышает уровень давления в соседних секторах MLT.

4. Обсуждаются возможные эффекты в протонных и электронных полярных сияниях, которые могут быть следствием неоднородного распределения ионного давления по MLT. На отдельном примере показано увеличение интенсивности электронных сияний в околополуденном секторе в период роста динамического давления солнечного ветра.

Данные спутников F6 и F7 взяты на страницах http://sd-www.jhuapl.edu; параметры MMП, плазмы солнечного ветра и индексы магнитной активности взяты на страницах http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/ и http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/. Авторы выражают благодарность руководителю проекта POLAR Парксу Г. и институту APL/JHU за предоставление УФ снимков полярных сияний.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Newell P.T., Burke W.J., Sanchez E.R., et al. // J. Geophys. Res. V. 96. 1991. No. A12. Art. No 21013.
- Воробьев В.Г., Ягодкина О.И. // Геомагн. и аэроном. 2006. Т. 46. № 1. С. 55; Vorobjev V.G., Yagodkina O.I. // Geomagn. Aeron. 2006. V. 46. No. 1. P.52.
- 3. Воробьев В.Г., Ягодкина О.И., Антонова Е.Е. // Геомагн. и аэроном. 2019. Т. 59. № 5. С. 582. Vorobjev V.G., Yagodkina O.I., Antonova E.E. // Geomagn. Aeron. 2019. V. 59. No. 5. P. 543.
- 4. Vorobjev V.G., Starkov G.V., Feldstein Ya.I. // Planet. Space Sci. 1976. V. 24. P. 055.
- Horwitz J.L., Akasofu S.I. // J. Geophys. Res. 1977. V. 82. No. 19. P. 2723.
- 6. *Stepanova M., Antonova E.E., Bosqued J.-M.* // Adv. Space Res. 2006. V. 38. No. 8. P. 1631.
- Rossolenko S.S., Antonova E.E., Yermolaev Yu.I. et al. // Proc. XXX Ann. Seminar "Physics of Auroral Phenomena". (Apatity, 2007). P. 81.
- Antonova E.E., Stepanova M., Kirpichev I.P., et al. // J. Atm. Sol.-Terr. Phys. 2018. V. 177. P. 103.
- Vorobjev V.G., Yagodkina O.I., Katkalov Y. // J. Atm. Sol.-Terr. Phys. 2013. V. 102. P. 157.
- Safargaleev V., Kozlovsky A., Honary F. et al. // Ann. Geophys. 2010. V. 28. P. 247.
- Воробьев В.Г., Ягодкина О.И. // Геомагн. и аэроном. 2009. Т. 49. № 6. С. 736; Vorobjev V.G., Yagodkina O.I. // Geomag. Aeron. 2009. V. 49. No. 6. Р. 703.

#### ВОРОБЬЕВ и др.

# Ion pressure in the precipitation region of dayside low latitude boundary layer

V. G. Vorobjev<sup>a, \*</sup>, O. I. Yagodkina<sup>a</sup>, E. E. Antonova<sup>b, c</sup>

<sup>a</sup>Polar Geophysical Institute, Apatity, 184209 Russia <sup>b</sup>Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow, 119991 Russia <sup>c</sup>Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997 Russia \*e-mail: vorobjev@pgia.ru

By using the DMSP F6 and F7 spacecraft observations, it is shown that during magnetic quietness the ion pressure in the region of the ionospheric projection of the low-latitude boundary layer does not depend on the  $B_z$  component of the interplanetary magnetic field, but increases rapidly with the growth of the solar wind dynamic pressure. A local increase in ion pressure in the midday sector is detected and its possible manifestation in the intensity of high-latitude daytime auroras is discussed.