

DOI: 10.37614/2588-0039.2020.43.005

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАВЛЕНИЯ ВЫСЫПАЮЩИХСЯ ИОНОВ В ДНЕВНОМ СЕКТОРЕ ОВАЛА И LLBL

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

¹ФГБНУ "Полярный 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. По данным низкоорбитальных спутников F6 и F7 исследовано давление высыпающихся ионов в областях ионосферных проекций низкоширотного граничного слоя (LLBL) и структурированных высыпаний аврорального овала (AOP) при низком уровне магнитной активности $AL > -200$ нТл. Показано, что как в LLBL, так и в AOP давление ионов увеличивается с ростом динамического давления солнечного ветра. Средний уровень давления в LLBL $\langle P_L \rangle = 0.27 \pm 0.07$ нПа, а в области AOP составляет в среднем ~ 0.5 от этого уровня. Распределение давления в LLBL по местному геомагнитному времени (MLT) демонстрирует ярко выраженное локальное увеличение давления в полуденном секторе $\sim 11-14$ MLT, в то время как в области AOP давление по MLT распределено достаточно равномерно. В результате этого в полуденном секторе существует значительная разность давлений между областями LLBL и AOP.

1. Введение

Давление, плотность и температура плазмы являются важными параметрами, которые в значительной степени определяют как состояние магнитосферы Земли, так и динамические процессы, протекающие в системе магнитосфера-ионосфера. Основные характеристики магнитосферной плазмы можно определить с использованием данных низковысотных спутников, которые с высоким пространственно-временным разрешением покрывают фактически всю высокоширотную ионосферу. Проведение таких исследований основывается на том, что в области изотропной плазмы её давление, температура и плотность остаются постоянными вдоль силовой линии геомагнитного поля. Таким образом, характеристики магнитосферной плазмы можно получить, проектируя ионосферные данные в экваториальную плоскость магнитосферы с использованием какой-либо модели магнитного поля или методами морфологического проецирования.

Давление плазмы в плазменном слое в значительной мере определяется динамическим давлением солнечного ветра (P_{sw}). В работе [Воробьев и др., 2019] по наблюдениям низковысотных спутников показано, что при всех уровнях магнитной активности давления плазмы на границах авроральных высыпаний почти линейно возрастает с ростом P_{sw} . Скорость солнечного ветра меняется в небольших пределах, поэтому его кинетическое давление определяется, главным образом, плотностью плазмы. Характеристики частиц в различных областях вторжений дневного сектора в зависимости от плотности плазмы солнечного ветра исследовались в работе [Воробьев и Ягодкина, 2006]. По данным спутников 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 на высотах ионосферы, определяемое как потоками высыпающихся частиц, так и их средней энергией, в дневные часы до настоящего времени не исследовалось.

Целью настоящей работы является определение давления плазмы на высотах ионосферы в областях высыпаний дневного сектора, характеризующихся как низкоширотный граничный слой и высыпания аврорального овала. Проведено сопоставление средних значений давления высыпающихся ионов в этих областях высыпаний в зависимости от динамического давления солнечного ветра.

2. Используемые данные

В работе использованы данные спутников DMSP F6 и F7 за полный 1986 г. - год спокойного Солнца в самом начале 22 цикла солнечной активности. Для определения положения границ авроральных высыпаний и времени их регистрации использовались данные автоматизированной системы обработки, которые представлены на страницах <http://civspace.jhuapl.edu>. Данные спутников в автоматизированной системе спроецированы вдоль силовых линий на высоту 110 км. Методика определения ионного давления по

измерениям спутников серии DMSP изложена в работе [Stepanova et al., 2006]. Чтобы избежать процессов, связанных с развитием магнитосферных возмущений, рассматривались данные спутников только при низком уровне магнитной активности $AL > -200$ нТл. Всего при $|AL| < 200$ нТл зарегистрировано 4460 пролетов спутника DMSP F7 в секторе 09:00 – 15:00 MLT северного и южного полушарий; дополнительно использованы данные спутника DMSP F6 в вечернем и утреннем секторах. Данные по уровню магнитной активности, а также параметры плазмы солнечного ветра и ММП были взяты на портале OMNIWeb (<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>).

3. Давление ионов в LLBL и AOP

На дневной стороне область мягких выпадений создаётся выпадающими частицами различных типов. Для определения области магнитосферного источника различных типов выпадений в работе [Newell et al., 1991] проведено сравнение характеристик выпадений, наблюдаемых на спутниках серии DMSP, с характеристиками частиц на больших высотах. В дневном секторе выделено четыре различные области, в том числе низкоширотный граничный слой (LLBL) и область структурированных выпадений аврорального овала (AOP), именуемая в некоторых статьях как "традиционный граничный плазменный слой".

LLBL (low-latitude boundary layer) является граничной областью дневной магнитосферы, в которой регистрируются частицы как переходного слоя, так и частицы магнитосферного происхождения. Средняя энергия ионов в этой области составляет в среднем 3-6 кэВ. Для области AOP (auroral oval precipitation) характерными являются большие потоки мягких (<1 кэВ) структурированных электронных выпадений. Здесь наблюдаются лучистые дуги сияний, а при низком уровне магнитной активности - короткоживущие (1-2 мин) лучистые формы и отдельные лучи.

Результаты исследования ионного давления в областях выпадений LLBL и AOP представлены на рис. 1-3. 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 с условием наличия данных о параметрах солнечного ветра и ММП было обнаружено 262 пролета спутника F7, в которых регистрировались выпадения граничного слоя и 577 пролетов, в которых наблюдались характерные для AOP выпадения.

Исследования показали, что средний уровень давления в области выпадений LLBL (P_L) составляет $\langle P_L \rangle = 0.27 \pm 0.07$ нПа, а в области овала сияний $\langle P_A \rangle = 0.14 \pm 0.03$ нПа, что составляет ~ 0.5 от уровня давления в выпадениях LLBL.

Зависимость ионного давления в LLBL и AOP от динамического давления солнечного ветра (P_{sw}) иллюстрирует рис. 1а и 1б соответственно. На рисунке представлены данные, усредненные в каждом интервале динамического давления по 1 нПа. Сплошная линия на рис. 1а соответствует уравнению регрессии $P_L = 0.10 P_{sw} + 0.06$ (коэффициент корреляции $r=0.90$), которое показывает рост давления в LLBL от ~ 0.15 нПа при давлении солнечного ветра в 1.0 нПа до ~ 0.65 нПа при $P_{sw} = 6.0$ нПа. Сплошная линия на рис. 1б соответствует уравнению: $P_A = 0.036 P_{sw} + 0.030$ с коэффициентом корреляции $r=0.98$. В соответствии с этим уравнением ионное давление в AOP увеличивается примерно в 4 раза от ~ 0.08 нПа до ~ 0.25 нПа при изменении P_{sw} от 1.0 до 6.0 нПа.

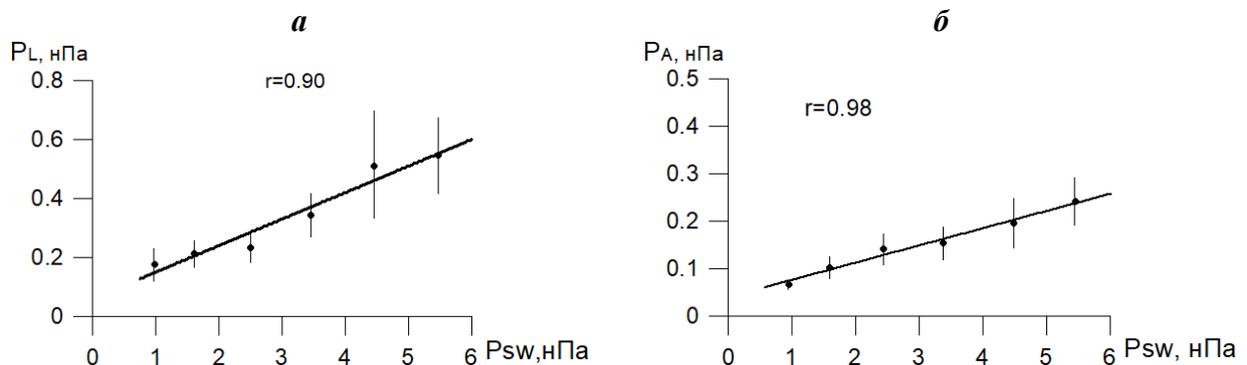


Рисунок 1. Давление ионов в областях выпадений LLBL (а) и AOP (б) в зависимости от динамического давления солнечного ветра в секторе 11:00-13:00 MLT.

Рисунок 2 иллюстрирует распределение ионного давления в *LLBL* (а) и *AOP* (б) по местному геомагнитному времени (MLT) при разных уровнях динамического давления солнечного ветра (от 1.0 нПа 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 MLT. Затем аналогичные линейные уравнения $P=P(P_{sw})$ были получены для всех 2-х часовых интервалов MLT со сдвигом на 1 час в восточном и западном направлениях (12:00-14:00, 13:00-15:00...12:00-10:00, 11:00-09:00 MLT и т.д.).

Рисунок 2а демонстрирует ярко выраженное локальное увеличение ионного давления в зоне высыпаний *LLBL* 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, типичного для наших массивов данных.

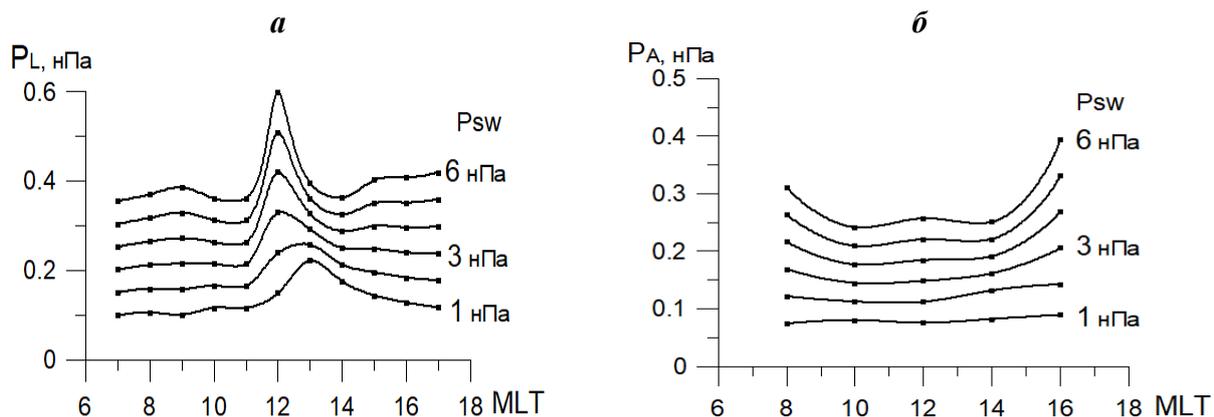


Рисунок 2. Распределение ионного давления в областях высыпаний *LLBL* (а) и *AOP* (б) по MLT при разных уровнях динамического давления солнечного ветра (от 1.0 нПа до 6.0 нПа).

Распределение ионного давления по MLT в области высыпаний аврорального овала достаточно равномерно в полуденном секторе, но несколько увеличивается в сторону вечерних и утренних часов MLT при высоких уровнях P_{sw} . В полуденном секторе здесь не наблюдается каких-либо ярких особенностей, обнаруженных ранее в области высыпаний *LLBL*.

Разность ионного давления между областями *LLBL* и *AOP* ($\Delta P = P_L - P_A$) иллюстрирует рис. 3. Рисунок показывает, что с увеличением динамического давления солнечного ветра в полуденном секторе существенно увеличивается разница в давлении между высыпаниями граничного слоя и высыпаниями овала полярных сияний. При $P_{sw}=6$ нПа разность давлений не только соизмерима, но и превышает уровень давления в самой области *AOP*.

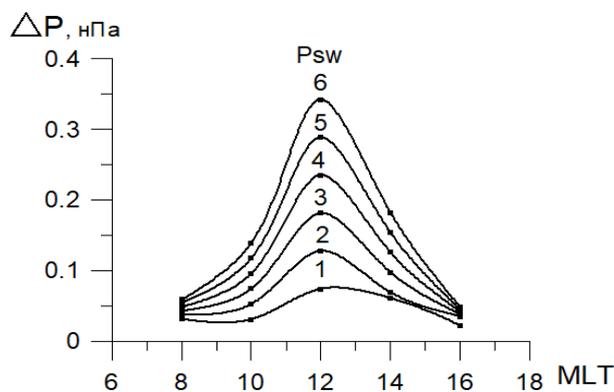


Рисунок 3. Распределение по MLT разности давлений между областями *LLBL* и *AOP*.

4. Заключение

Основные результаты исследования можно сформулировать следующим образом.

1. В областях дневных высыпаний, топологически связанных с низкоширотным граничным слоем (*LLBL*) и овалом сияний (*AOP*), давление плазмы существенно увеличивается с ростом динамического давления солнечного ветра (P_{sw}). Средний уровень давления в *LLBL* составляет $\langle P_L \rangle = 0.27 \pm 0.07$ нПа, а в *AOP* ~0.5 от этого уровня.

2. Распределение давления в высыпаниях *LLBL* по MLT демонстрирует ярко выраженное локальное увеличение давления в полуденном секторе (~11-14 MLT), величина которого растет с увеличением P_{sw} . Давление в *AOP* по MLT в полуденные часы распределено достаточно равномерно, в результате чего в секторе ~10-14 MLT появляется значительная разность давлений между областями *LLBL* и *AOP*.

При определении давления плазмы в экваториальной плоскости с использованием данных миссии THEMIS в работе [Кирпичев и Антонова, 2011] было показано, что на геоцентрических расстояниях 7-10 Re давление плазмы близко к изотропному и азимутально-симметричному, однако *LLBL* из общего массива данных не выделялся, поэтому полученные в настоящей работе результаты по давлению плазмы в *LLBL* являются пока единственными.

Представляют определенный интерес результаты сравнения величин ионного давления между областями высыпаний *LLBL* и *AOP*. Разность давления между этими областями, показанная на рис. 3, может свидетельствовать о наличии значительных радиальных градиентов, "желоба" давления плазмы в полуденном секторе магнитосферы. Поведение ионных высыпаний указывает на то, что по направлению к Земле от подсолнечной магнитопаузы достаточно высокое давление в области *LLBL* сначала может быстро уменьшаться к уровню давления в области проекции *AOP*, а затем начинается более плавный естественный рост давления с уменьшением расстояния до Земли. Радиальные масштабы такой вариации давления можно примерно оценить по ширине областей высыпаний *LLBL* и *AOP* (1° широты соответствует ~1 Re), которая при V_z ММП >0 составляет ~ 2° широты каждая [Vorobjev et al., 2013, Fig. 7]. Однако, данный эффект требует более внимательного анализа с учетом сильного искажения магнитного поля вблизи магнитопаузы.

Благодарности. Данные спутника DMSP F6 и F7 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/>.

Литература

- Воробьев В.Г., Ягодкина О.И. Влияние плотности солнечного ветра на характеристики авроральных высыпаний // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 46. № 1. С. 55–61. 2006.
- Воробьев В.Г., Ягодкина О.И., Антонова Е.Е. Ионное давление на границах авроральных высыпаний и его связь с динамическим давлением солнечного ветра // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 59. № 5. С. 582–593. 2019. Doi:10.1134/S0016794019050146
- Кирпичев И.П., Антонова Е.Е. Распределение давления плазмы в экваториальной плоскости магнитосферы Земли на геоцентрических расстояниях от 6 до 10 Re по данным международного проекта THEMIS // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 51. № 4. С. 456–461. 2011.
- Newell P.T., Burke W.J., Sanchez E.R., Meng C.-I., Greenspan M.E., Clauer C.R. The low-latitude boundary layer and the boundary plasma sheet at low altitude: prenoon precipitation regions and convection reversal boundaries // J. Geophys. Res. V.96. No. A.12. P.21013–21023. 1991. Doi:10.1029/91JA01818
- 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. Doi:10.1016/j.asr.2006.05.013
- Vorobjev V.G., Yagodkina O.I., Katkalov Y. Auroral Precipitation Model and its applications to ionospheric and magnetospheric studies // J. Atm. S.-Terr. Phys. V. 102. P. 157–171. 2013. Doi:10.1016/j.jastp.2013.05.007