

DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.013

## ДАВЛЕНИЕ ИОНОВ В НОЧНОЙ АВРОРАЛЬНОЙ ЗОНЕ ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЯХ ДИНАМИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

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>ФГБНУ "Полярный геофизический институт", г. Апатиты (Мурманская обл.)

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

<sup>3</sup>Институт космических исследований, г. Москва

**Аннотация.** Данные спутников серии DMSP использованы для исследования ионного давления в ночном секторе авроральной зоны в магнитоспокойные периоды при экстремальных значениях динамического давления солнечного ветра ( $P_{sw}$ ). Показано, что при экстремально высоких уровнях динамического давления солнечного ветра давление ионов на границе изотропизации (ГИ) увеличивается с ростом  $P_{sw}$  и может достигать уровня 4-6 нПа при  $P_{sw} = 20-22$  нПа. Получены широтные профили ионного давления при средних уровнях динамического давления равных 0.5 нПа, 2.1 нПа и 16.3 нПа, указывающие на то, что увеличение  $P_{sw}$  сопровождается не только ростом давления плазмы в авроральной зоне, но и расширением области авроральных высыпаний, главным образом за счет смещения ГИ в более низкие широты. Проведено проецирование широтного профиля ионного давления на экваториальную плоскость магнитосферы при  $P_{sw} \sim 2.0$  нПа.

### 1. Введение

В экваториальной плоскости магнитосферы на расстояниях, при которых гирорадиус ионов становится больше радиуса кривизны силовой линии, происходит изотропизация пич-углового распределения энергичных частиц. Радиальное расстояние, на котором возникает изотропизация, зависит от энергии частиц: чем меньше энергия, тем дальше от Земли происходит изотропизация. В области изотропной плазмы её свойства остаются постоянными вдоль геомагнитной силовой линии, что позволяет определять характеристики магнитосферной плазмы по наблюдениям высыпающихся частиц на высотах ионосферы. В работе [Newell et al., 1996] по данным низкоорбитальных спутниках серии DMSP выделена граница, названная границей b2i, на которой поток энергии высыпающихся ионов достигает максимума. В [Newell et al., 1998] статистически показано, что положение b2i хорошо соответствует границе изотропизации (ГИ) ионов с энергией 30 кэВ.

Одним из наиболее важных параметров магнитосферы является давление плазмы, которое в значительной мере определяет распределение продольных токов и устойчивость плазменных доменов в магнитосфере. Усредненное распределение давления плазмы в окружающем Землю плазменном кольце на геоцентрических расстояниях от 6 Re до 10 Re получено в работе [Кирпичев и Антонова, 2011] по данным спутников проекта THEMIS. В работе [Tsyganenko and Mukai, 2003] наблюдения спутника GEOTAIL на расстояниях от 10 Re до 50 Re в ночной магнитосфере использованы для создания 2D модели распределения давления плазмы. Результаты этого исследования указывают на значительный рост давления плазмы в экваториальной плоскости магнитосферы с увеличением динамического давления солнечного ветра ( $P_{sw}$ ). По данным спутников DMSP давление ионов в предполуночном секторе авроральной зоны на границе b2i в зависимости от  $P_{sw}$  исследовалось в работе [Воробьев и др., 2019], где обнаружена фактически линейная связь этих параметров.

Результаты цитируемых выше исследований, были получены путем обработки больших массивов данных, в которых статистически значимые наборы данных представлены, главным образом, в интервале  $P_{sw}$  от 1.0 до 6.0 нПа. Целью настоящей работы является определение величины ионного давления на ГИ и широтного распределения давления ионов при экстремальных значениях динамического давления солнечного ветра. Под экстремальными значениями динамического давления будем понимать значения  $P_{sw} < 1.0$  нПа и  $P_{sw} > 6.0$  нПа. Такие исследования возможны только в результате анализа отдельных, специально отобранных для этих целей событий.

### 2. Используемые данные

В работе использованы данные спутников DMSP F6 и F7 за полный 1986 г. и данные спутников этой же серии за отдельные, специально выбранные периоды. Спутники серии DMSP каждую секунду

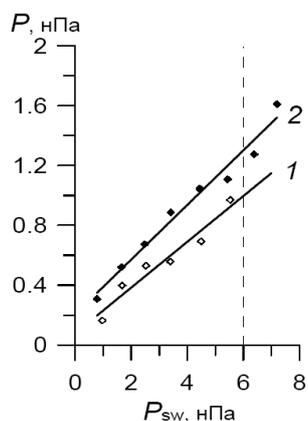
регистрировали спектры высыпавшихся ионов в диапазоне энергий от 30 эВ до 30 кэВ. Для определения ионного давления по измерениям характеристик высыпавшихся частиц была использована методика, предложенная в работе [Stepanova et al., 2006]. Чтобы избежать значительного влияния суббуревых процессов на результаты исследования, важным критерием при отборе данных и интервалов исследования являлся низкий уровень магнитной активности в авроральной зоне,  $AL > -200$  нТл.

Для изучения влияния экстремально больших уровней  $P_{sw}$  на величину ионного давления были отобраны магнитные бури, перед началом главной фазы которых при положительных значениях Dst индекса наблюдались большие значения  $P_{sw}$ . Такие интервалы классически именуются как фазы DCF (disturbance of corruscular flux) магнитных бурь. При условии низкого уровня магнитной активности в авроральной зоне таким интервалам соответствовали фазы DCF магнитных бурь 13-14 июня 1998 г., 16-17 апреля 1999 г., 18-19 марта 2002 г., 19-20 ноября 2007 г. и 31 мая 2013 г. Магнитным бурям 31 мая 2013 г. и 18 марта 2002 г. предшествовали магнитоспокойные периоды длительностью более 24 ч, которые были использованы для изучения широтного распределения давления ионов при низких и экстремально низких значениях  $P_{sw}$ .

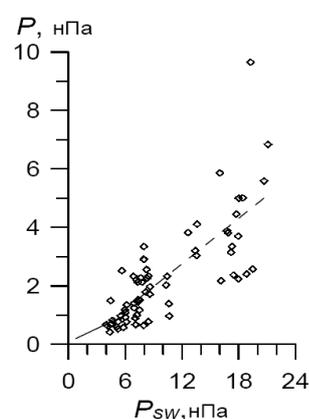
### 3. Влияние $P_{sw}$ на величину ионного давления на границе изотропизации (ГИ)

Потоки энергии ионов ( $J_i$ ) и их средние энергии ( $E_i$ ) в ночном секторе авроральной зоны постепенно увеличиваются с уменьшением широты, достигая максимума на экваториальном крае высыпаний. В соответствии с [Newell et al., 1996], положение максимума  $J_i$  определялось в качестве границы изотропизации. Экваториальнее ГИ потоки энергии высыпавшихся ионов быстро падают. Таким образом, ГИ располагается в области максимума ионного давления, а её широта будет определять наиболее экваториальную область ионосферы, ионное давление в которой можно проецировать в экваториальную магнитосферу.

Из-за специфики траекторий спутников DMSP максимальное число спутниковых пересечений области авроральных высыпаний в периоды отобранных для исследования событий располагалось в секторе 18:00 – 21:00 MLT. На рис. 1 по статистическому набору данных за 1986 г. показана зависимость ионного давления на ГИ от динамического давления солнечного ветра в этом секторе MLT (линия 1). Так как граница изотропизации не является изобарой, величина ионного давления на ГИ зависит от MLT. Для сравнения на рис. 1 (сплошная линия 2) представлены аналогичные данные в секторе 21:00-24:00 MLT из работы [Воробьев и др., 2019]. Рисунок показывает, что на ГИ давление в секторе 21-24 MLT несколько выше, чем давление в секторе 18-21 MLT. Это наглядно отображается штриховой линией, проведенной на уровне  $P_{sw}=6$  нПа, при котором давление ионов в секторе 18-21 MLT составляет ~1.0 нПа, а в секторе 21-24 MLT ~1.3 нПа. Среднеквадратичное отклонение данных на рис. 1 составляет ~0.2-0.3 нПа и более детально обсуждается в работе [Воробьев и др., 2019].



**Рисунок 1.** Давление ионов на границе изотропизации (ГИ) в зависимости от динамического давления солнечного ветра ( $P_{sw}$ ): 1 - в секторе 18-21 MLT, 2 - в секторе 21-24 MLT.

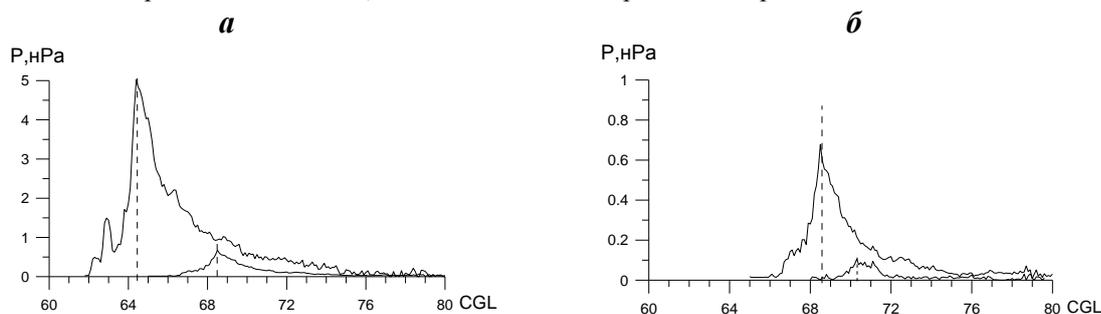


**Рисунок 2.** Давление ионов на ГИ в секторе 18-21 MLT в периоды экстремально больших значений  $P_{sw}$ .

На рис. 2 показано ионное давление на ГИ в секторе 18:00-21:00 MLT с привлечением данных за периоды фазы DCF, отобранных нами магнитных бурь. Сплошная линия около начала осей координат соответствует данным, показанным на рис.1, линия 1. Штриховая линия соответствует уравнению линейной регрессии по точкам на графике. Разброс точек значительный, но очевиден близкий к линейному рост ионного давления с увеличением  $P_{sw}$ . Отдельно стоящая точка при  $P_{sw}=19.3$  нПа указывает на то, что давление ионов на ГИ может достигать величины ~10 нПа.

#### 4. Широтные профили ионного давления при разных уровнях $P_{sw}$

В событии 18 марта 2002 г. наблюдался резкий скачок динамического давления солнечного ветра, зарегистрированный как SSC в 13:22 UT, после которого динамическое давление солнечного ветра оставалось очень высоким в течение  $\sim 10$  ч, варьируясь в интервале 14-20 нПа. Данные спутников DMSP за этот период использованы для изучения широтного распределения давления ионов при экстремально высоких уровнях  $P_{sw}$ . На рис. 3а (верхняя кривая) представлен широтный профиль ионного давления, полученный усреднением по 10 пересечениям спутников DMSP зоны авроральных высыпаний. По горизонтальной оси на рисунке отложена исправленная геомагнитная широта (CGL). Усреднение проводилось методом наложения эпох относительно границы изотропизации, среднее положение которой составило  $\langle \Phi' \rangle = 64.6^\circ$  CGL,  $\langle MLT \rangle = 20.4$  при  $\langle AL \rangle = -44$  нТ. При величине динамического давления солнечного ветра  $\langle P_{sw} \rangle = 16.3$  нПа, ионное давление на границе изотропизации  $\langle P_{max} \rangle = 5.1$  нПа.



**Рисунок 3.** Средние профили ионного давления в секторе 18-21 MLT. *а* - при экстремально высоком (верхняя кривая) и «средне» низком уровне  $P_{sw}$ ; *б* - при «средне» низком (верхняя кривая) и экстремально низком уровне  $P_{sw}$ . Вертикальные штриховые линии – граница изотропизации.

При спокойных условиях динамическое давление солнечного ветра обычно не превышает  $\sim 3$  нПа. Так в работе [Tsuganenko and Mukai, 2003] среднее  $P_{sw} \sim 2.2$  нПа, а по данным за 1986 г.  $\sim 2.4$  нПа. До начала возмущений в солнечном ветре в событии 18 марта 2002 г динамическое давление солнечного ветра длительное время оставалось на уровне около  $\sim 2$  нПа. На рис. 3а (нижняя кривая) представлен средний широтный профиль ионного давления за этот период. В увеличенном масштабе этот же широтный профиль показан на рис. 3б (верхняя кривая). При «средне» низком динамическом давлении  $\langle P_{sw} \rangle = 2.1$  нПа давление ионов на ГИ составило  $\langle P_{max} \rangle = 0.7$  нПа; среднее положение ГИ:  $\langle \Phi' \rangle = 68.6^\circ$  CGL,  $\langle MLT \rangle = 20.0$  при  $\langle AL \rangle = -49$  нТл.

В спокойный период до начала магнитной бури 31 мая 2013 г. наблюдался очень низкий уровень  $P_{sw}$ , величина которого была менее 1 нПа. На рис. 3б (нижняя кривая) показан средний широтный профиль ионного давления для  $\langle P_{sw} \rangle = 0.5$  нПа. Уровень ионного давления на ГИ составил только  $\langle P_{max} \rangle = 0.1$  нПа; среднее положение ГИ:  $\langle \Phi' \rangle = 72.2^\circ$  CGL,  $\langle MLT \rangle = 20.4$  при  $\langle AL \rangle = -26$  нТл.

Сопоставление данных, представленных на рис. 3 уверенно демонстрирует, что как величина максимума ионного давления в авроральной зоне, так и широтное положение границы изотропизации существенным образом зависят от динамического давления солнечного ветра. С ростом  $P_{sw}$  уровень ионного давления увеличивается, в то время как ГИ смещается в более низкие широты. Так при  $\langle P_{sw} \rangle = 16.3$  нПа широта ГИ составляет  $\sim 64.6^\circ$  CGL, при  $\langle P_{sw} \rangle = 2.1$  нПа -  $68.6^\circ$  CGL, а при  $\langle P_{sw} \rangle = 0.5$  нПа уже  $72.2^\circ$  CGL.

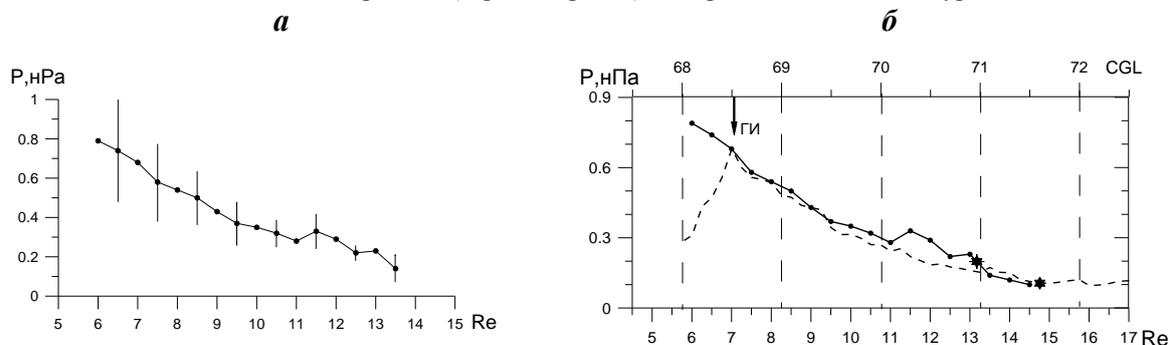
#### 5. Полученные результаты, краткое обсуждение

Данные спутников серии DMSP использованы для исследования ионного давления в секторе 18-21 MLT авроральной зоны при экстремальных значениях динамического давления солнечного ветра. Основные результаты можно сформулировать следующим образом:

1. Давление ионов на границе изотропизации (ГИ) в секторе 18:00 - 21:00 MLT составляет  $\sim 0.8$  от ионного давления в секторе 21:00 - 24:00 MLT.
2. При экстремально высоких уровнях динамического давления солнечного ветра давление ионов на ГИ увеличивается с ростом  $P_{sw}$  и может достигать уровня 4-6 нПа при  $P_{sw} = 20-22$  нПа.
3. Получены широтные профили ионного давления при средних уровнях динамического давления 0.5 нПа, 2.1 нПа и 16.3 нПа, указывающие на то, что увеличение  $P_{sw}$  сопровождается не только ростом давления плазмы в авроральной зоне, но и расширением области авроральных высыпаний, главным образом за счет смещения ГИ в более низкие широты. При указанных выше уровнях  $P_{sw}$  граница изотропизации располагалась на исправленных геомагнитных широтах  $70.2^\circ$ ,  $68.6^\circ$  и  $64.6^\circ$  соответственно.

Авроральные высыпания на широтах выше границы изотропизации рассматриваются как изотропные. В области изотропных высыпаний в условиях магнитоэлектростатического равновесия давление плазмы постоянно

вдоль линии магнитного поля и его можно использовать в качестве “маркера” при сравнении измерений на больших и малых высотах. Такой метод называется методом «морфологического проецирования», для использования которого необходимы знания как о широтном распределении давления на высотах ионосферы, так и о распределении давления плазмы в экваториальной плоскости магнитосферы. Для определения ионного давления в магнитосфере были использованы наблюдения спутников THEMIS. Радиальное распределение давления в экваториальной плоскости ( $Z_{SM} = 0 \pm 1$  Re) на меридиане  $MLT = 20 \pm 1$  показано на рис. 4а. Профиль давления получен для магнитоспокойных условий ( $AL > -200$  нТ,  $Dst > -20$  нТ,  $P_{sw} = 2.0 \pm 0.2$  нПа), которые идентичны условиям, при которых был получен широтный профиль ионного давления, показанный на рис. 3б (верхняя кривая) для среднего спокойного уровня  $P_{sw}$ .



**Рисунок 4.** Радиальное распределение ионного давления на меридиане  $20 \pm 1$  MLT (а). Проекция широтного профиля ионного давления при  $\langle P_{sw} \rangle = 2.1$  нПа на экваториальную плоскость магнитосферы (б).

На рис. 4б показана проекция широтного профиля ионного давления в экваториальную плоскость магнитосферы при условии равенства давлений вдоль геомагнитных силовых линий. Верхняя горизонтальная шкала на рис. 4б показывает исправленные геомагнитные широты, а нижняя – радиальное расстояние, на которое эти широты проектируются. Рисунок показывает, что при средних спокойных условиях граница изотропизации в экваториальной плоскости располагается на расстоянии  $\sim 7.0$  Re. Приполюсная граница ионных высыпаний статистически совпадает с приполюсной границей электронных высыпаний и определена как граница b5i в [Newell et al., 1998]. Положение этой границы в экваториальной плоскости по рис. 4б можно определить двумя способами: (1) по уровню давления на этой границе – звёздочка на 13.3 Re и (2) по средней широте границы – звёздочка на 14.8 Re. Таким образом, приполюсная граница авроральных высыпаний в магнитоспокойные периоды при среднем спокойном уровне динамического давления солнечного ветра находится в экваториальной плоскости на расстояниях 13-15 Re.

Полученные в работе результаты свидетельствуют о том, что в магнитоспокойные периоды динамическое давление солнечного ветра в значительной мере определяет структуру магнитосферы и радиальное распределение давления магнитосферной плазмы.

**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/>.

## Литература

- Newell P.T., Feldstein Ya.I., Galperin Y.I., et al. The morphology of nightside precipitation // J. Geophys. Res. 1996. V. 101. No. A5. P. 10737-10748. Doi:10.1029/95JA03516
- Newell P.T., Sergeev V.A., Bikkuzina G.R., Wing S. Characterizing the state of the magnetosphere: testing the ion precipitation maxima latitude (b2i) and the ion isotropy boundary // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. No. A3. P. 4739-4745. Doi:10.1029/97JA03622
- 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 аэронавигация. 2011. Т. 51. № 4. С. 456-461. Doi:10.7868/S0016794016040064
- Tsyganenko N.A., Mukai T. Tail plasma sheet models derived from Geotail particle data // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. No. A3. 1136. Doi:10.1029/2002JA009707
- 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 аэронавигация. 2019. Т. 59. № 5. С. 582–593. Doi:10.1134/S0016794019050146
- 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. 2006. V. 38. No. 8. P. 1631-1636. Doi:10.1016/j.asr.2006.05.013