

DOI: 10.25702/KSC.2588-0039.2019.42.40-43

## ИОННОЕ ДАВЛЕНИЕ НА ГРАНИЦАХ АВРОРАЛЬНЫХ ВЫСЫПАНИЙ В СПОКОЙНЫЕ ПЕРИОДЫ И В ПЕРИОДЫ СУББУРЬ

В.Г. Воробьев<sup>1</sup>, О.И. Ягодкина<sup>1</sup>, Е.Е. Антонова<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>ФГБНУ “Полярный геофизический институт”, г. Апатиты, Россия

<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 спутника DMSP F7 за 1986 г. использованы для изучения поведения ионного давления на границах авроральных высыпаний. Рассмотрено более 5000 пролетов в секторе 21:00-24:00 MLT. Величина ионного давления определялась как среднее значение, полученное за 5 секунд наблюдений, что соответствует расстоянию длиной ~40 км на участках траектории спутника, примыкающих к границам высыпаний. Показано, что при всех уровнях магнитной активности давления плазмы на границах авроральных высыпаний почти линейно возрастает с ростом динамического давления солнечного ветра ( $P_{sw}$ ). Получено широтное положение границ высыпаний и давление плазмы на границах в периоды всех фаз среднестатистической суббури интенсивностью в максимуме AL=-410 нТл. Показано, что с увеличением динамического давления наблюдается не только значительный рост давления плазмы на границах авроральных высыпаний, но и изменение широтного положения самих границ. С ростом  $P_{sw}$  широта приполюсной границы овала увеличивается, в то время как широта экваториальной границы уменьшается. Несмотря на значительное расширение области высыпаний, широтный градиент давления между границами овала в спокойные периоды (AL=-18 нТл, ММП  $B_z=+1.4$  нТл) при отсутствии каких-либо возмущений в авроральной зоне увеличивается примерно в два раза от 0.06 нПа/град до 0.12 нПа/град.

### 1. Введение

Давление, плотность и температура плазмы в плазменном слое в значительной степени определяют как состояние магнитосферы Земли, так и динамические процессы, протекающие в системе магнитосфера-ионосфера. С помощью спутниковых наблюдений *in situ* свойства плазмы плазменного слоя исследовались в многочисленных работах. Альтернативным методом определения основных характеристик магнитосферной плазмы может быть использование 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. В исследованиях такого рода важное значение имеет выбор модели геомагнитного поля, от которой в условиях различной геомагнитной активности зависит точность получаемого пространственного распределения характеристик магнитосферной плазмы.

В работах [Антонова и др., 2014] использован метод “морфологического проецирования”, исключающий влияние модели магнитного поля на результаты исследования. При изотропии давления в условиях магнитостатического равновесия давление плазмы, постоянное вдоль силовых линий, можно использовать в качестве “маркера” при сравнении измерений на больших и малых высотах. Авроральные высыпания, регистрируемые спутниками DMSP между границами  $b2i$  и  $b5$  [Newell et al., 1996], характеризуются как изотропные. Эта область между границами  $b2i$  и  $b5$  фактически совпадает с ночной частью области AOP (высыпания аврорального овала) по терминологии, используемой в работе [Vorobjev et al., 2013].

Целью настоящей работы является изучение поведения ионного давления на границах аврорального овала в периоды геомагнитных возмущений и определение взаимосвязи между величиной ионного давления и динамическим давлением солнечного ветра.

### 2. Используемые данные

В работе использована база данных спутников DMSP за 1986 г. [Vorobjev et al., 2013; Воробьев и др., 2015]. Кроме характеристик высыпающихся частиц, база данных для каждого пролета спутника через зону авроральных высыпаний содержит необходимые для целей настоящего исследования средние 5 мин значения AL индекса магнитной активности и среднечасовые значения параметров солнечного ветра.

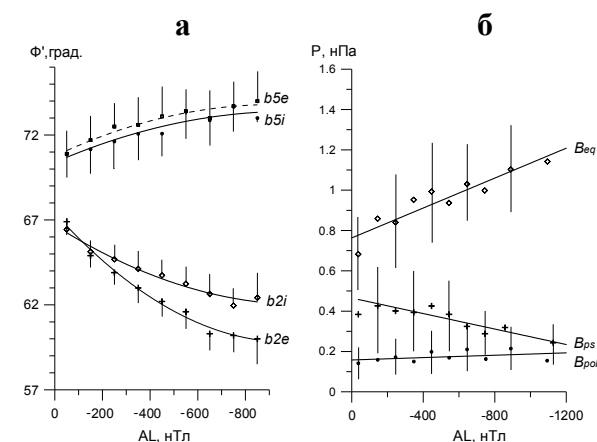
В настоящем исследовании основное внимание уделено ночной части зоны авроральных высыпаний, поэтому использованы данные спутника DMSP F7, траектория которого центрирована на меридиан 09-21 MLT. Всего рассмотрено более 5000 пролетов в секторе 21:00-24:00 MLT. Спутник F7 каждую секунду регистрировал спектр высыпавшихся ионов в диапазоне энергий от 30 эВ до 30 кэВ. Для вычисления ионного давления использовалась методика, предложенная в работе [Stepanova et al., 2006]. Величина ионного давления рассчитывалась как среднее значение, полученное за 5 секунд наблюдений с внутренней по отношению к зоне высыпаний стороны границы. Полетное время 5 секунд соответствует расстоянию длиной ~40 км на участках траектории спутника, примыкающих к границам высыпаний.

### 3. Давление на границах авроральных высыпаний

В работе [Старков и др., 2003] показано, что овал полярных сияний статистически совпадает с областью структурированных высыпаний AOP (auroral oval precipitation), которая в ночном секторе определяется высыпаниями, регистрируемыми границами  $b2e$  и  $b5e$  по терминологии Newell et al. [1996]. нас будут интересовать не только границы овала сияний, но и характеристики ионных высыпаний на этих границах, позволяющие получить величину ионного давления. Ниже, наряду с электронными границами, мы рассмотрим соответствующие границы  $b2i$  и  $b5i$  для высыпавшихся ионов. Символы «e» и «i», следующие за нумерацией границ, относятся к электронным и ионным высыпаниям, соответственно.

На рис. 1а показано широтное положение вышеупомянутых границ в секторе 21:00-24:00 MLT в зависимости от уровня магнитной активности в авроральной зоне, выраженной величиной AL индекса. Положение границы  $b5$  определяется широтой, на которой величина потока энергии высыпавшихся частиц резко уменьшатся в 4 раза [Newell et al., 1996]. Границы  $b5$  определяются отдельно для электронов и ионов, но их широтное положение с учетом ошибок при усреднении фактически совпадает, что хорошо иллюстрирует рис. 1а. Это дает основание рассматривать границу  $b5i$  в качестве приполюсной границы овала, которая в дальнейшем будет обозначаться как  $B_{pol}$ .

Граница  $b2i$  соответствует в работе [Newell et al., 1996] положению максимума потоков высыпавшихся ионов и рассматривается как граница изотропизации (ГИ). Положение границы  $b2i$ , полученное по данным спутников DMSP, хорошо совпадает с ГИ, определенной по наблюдениям энергичных захваченных и высыпавшихся частиц на спутниках серии NOAA. Результаты исследования взаимного



**Рисунок 1.** Широтное положение границ авроральных высыпаний (а) и величина ионного давления на границах высыпаний (б) в зависимости от AL индекса магнитной активности.

положение дискретных форм полярных сияний и границ авроральных высыпаний показали, что в ночные часы наиболее экваториальные дуги сияний располагаются вблизи границы  $b2i$ , но всегда полюснее неё. Обозначим ниже эту границу как  $B_{eq}$ .

Граница  $b2e$  определена в работе [Newell et al., 1996], как приполюсный край области, где изменение средней энергии электронов с увеличением широты  $dE_e/d\Phi > 0$ . Эта точка определяет начало главного или центрального плазменного слоя в хвосте магнитосферы. Давление ионов на этой границе обозначим как  $B_{ps}$ .

На рис. 1б показана средняя величина ионного давления на границах  $B_{pol}$ ,  $B_{eq}$  и  $B_{ps}$  в зависимости от величины AL индекса. Сплошные линии на рисунке соответствуют уравнениям линейной регрессии. Рис. 1б показывает значительный рост ионного давления с увеличением  $|AL|$  на экваториальной границе овала, примерно постоянное давление на приполюсной границе овала и уменьшение давления на границе  $B_{ps}$ . Уменьшение ионного давления на границе  $B_{ps}$  связано с тем, что при  $|AL| < 200$  нТл эта граница располагается экваториальнее ГИ, где потоки захваченных ионов преобладают над потоками высыпавшихся частиц.

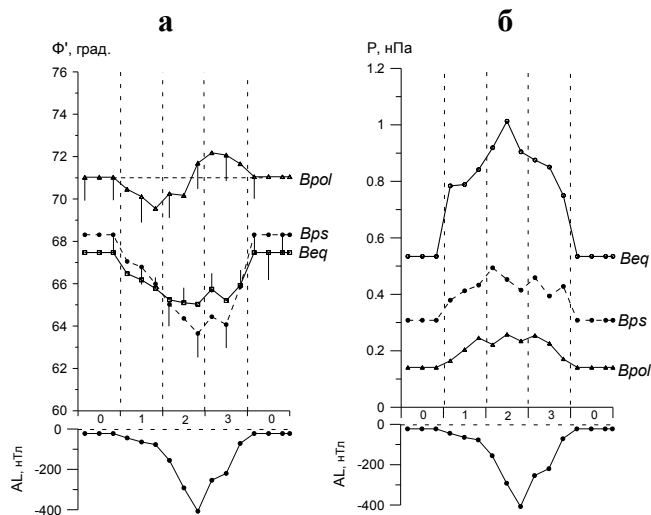
Давление плазмы ( $P$ ) на границах авроральных высыпаний в зависимости от динамического давления солнечного ветра ( $P_{sw}$ ) показано на рис. 2. Для построения графиков на рис. 2а использованы все имеющиеся в нашем распоряжении измерения ионного давления независимо от уровня магнитной активности. Влияние уровня магнитной активности в каждом измерении  $P$  было компенсировано использованием уравнений регрессии согласно рис. 1б. Рис. 2а показывает значительный рост давления плазмы на всех границах высыпаний с увеличением динамического давления солнечного ветра. Давление плазмы увеличивается и на границе  $B_{ps}$ . Это означает, что с ростом динамического давления солнечного ветра давление плазмы вдоль магнитной силовой линии ( $P_{\parallel}$ ) увеличивается и в области магнитосферы на расстояниях от Земли ближе, чем положение ГИ, в области, где  $P_{\perp} > P_{\parallel}$ . На рис. 2б показаны аналогичные зависимости  $P = P(P_{sw})$  при низком

уровне магнитной активности  $|AL| < 200$  нТл. Очевидно, что и в спокойных условиях рост  $P_{sw}$  приводит к увеличению давления плазмы на границах высыпаний.

#### 4. Вариации ионного давления в периоды суббури

Для исследования характеристик высыпаний в периоды суббури для каждого пролета спутника была определена фаза магнитосферной суббури, в период которой космический аппарат регистрировал зону высыпаний. Было выделено четыре стадии магнитного возмущения: спокойный период и фазы зарождения, развития и восстановления суббури. Фазы суббури дополнительно разбиты на три равные по времени интервала, соответствующие начальной, средней и заключительной стадиям каждой фазы. Так как суммируются данные, относящиеся к разным возмущениям, полученное распределение, содержащее девять экспериментальных точек, будем называть синтетической суббурей.

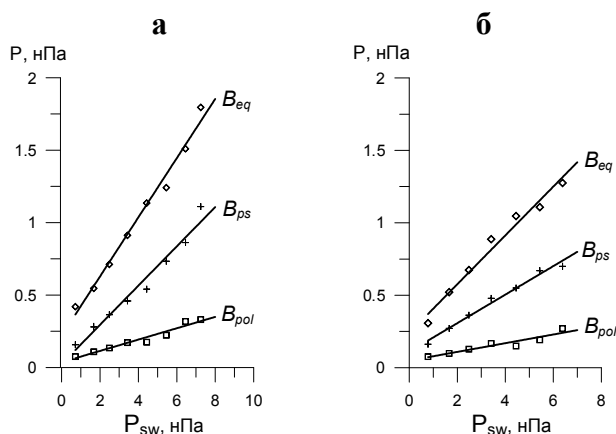
В нижней части рис. 3 показано магнитное возмущение, соответствующее синтетической изолированной суббуре. По горизонтальной оси отложены фазы возмущения: 0 – спокойный период, 1 – фаза зарождения, 2 – фаза развития и 3 – фаза восстановления суббури. Спокойному периоду соответствует уровень магнитной активности  $AL = -18$  нТл. В период фазы зарождения уровень  $AL$  постепенно уменьшается и достигает примерно  $-85$  нТл перед началом фазы развития суббури. Величина среднего возмущения в максимуме составляет  $-410$  нТл. В период фазы восстановления магнитная активность возвращается к своему спокойному уровню.



**Рисунок 3.** Широтное положение границ высыпаний (а) и вариации ионного давления на границах (б) в периоды всех фаз суббури.

ветра на временных масштабах суббури изменяется незначительно. В этой связи увеличение ионного давления в период фазы зарождения, по всей вероятности, связан с появлением отрицательных значений  $V_z$  компоненты ММП, усилением продольных токов R1 и увеличением магнитного потока в долях хвоста магнитосферы. Высокий уровень давления плазмы (0.9-1.0 нПа) на границе  $B_{eq}$  в период фазы развития и восстановления суббури, по-видимому, связан с формированием продольных токов R2.

Верхняя панель рис. 4 показывает давление плазмы на границах высыпаний в зависимости от динамического давления солнечного ветра в период фазы «0» ( $AL = -18$  нТл,  $V_z = +1.4$  нТл). Рис. 4 (верхняя панель) показывает,

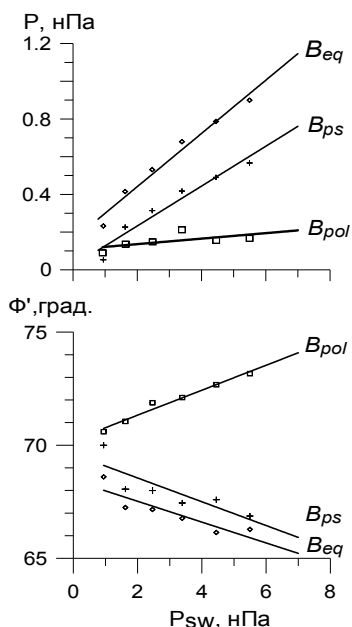


**Рисунок 2.** Давление плазмы ( $P$ ) на границах авроральных высыпаний в зависимости от динамического давления солнечного ветра ( $P_{sw}$ ). (а) - все данные; (б) – при  $|AL| < 200$  нТл.

На верхней панели рис. 3а показано широтное положение границ высыпаний в спокойный период и в периоды всех фаз суббури. В период фазы зарождения наблюдается отчетливо выраженное смещение всех границ высыпаний в более низкие широты. В период фазы развития суббури экваториальные границы высыпаний ( $B_{eq}$  и  $B_{ps}$ ) продолжают смещаться к экватору, в то время как широта граница  $B_{pol}$  увеличивается в течение всей фазы развития и начальной стадии фазы восстановления суббури. Движение границы  $B_{pol}$  к полюсу соответствует расширению «выпуклости» в полярных сияниях и смещению её приполюсной кромки в высокие широты.

Рис. 3б показывает вариации ионного давления на границах высыпаний. В спокойный период при северной ориентации ММП давление на границах  $B_{pol}$  и  $B_{eq}$  в среднем составляет  $\sim 0.15$  нПа и  $\sim 0.55$  нПа, соответственно. Значительное увеличение давления на границах высыпаний наблюдается уже в период фазы зарождения суббури. Динамическое давление плазмы солнечного

что в спокойные периоды, при полном отсутствии каких-либо геомагнитных возмущений давление плазмы на границах  $B_{eq}$  и  $B_{ps}$  значительно увеличивается с ростом  $P_{sw}$ . На нижней панели рис. 4 показано широтное положение границ в период фазы «0». Наблюдается отчетливая тенденция к изменению положения границ в зависимости от  $P_{sw}$ . При изменении  $P_{sw}$  от 1 до 6 нПа широта границы  $B_{pol}$  увеличивается на  $\sim 3^\circ$  CGL, в то время как широта границ  $B_{ps}$  и  $B_{eq}$  уменьшается на  $\sim 2.5^\circ$  CGL. Таким образом, широтные размеры области авроральных высыпаний значительно увеличиваются с ростом  $P_{sw}$ , составляя соответственно  $\sim 3^\circ$  и  $\sim 7^\circ$  CGL. Несмотря на значительное расширение области высыпаний, широтный градиент давления между приполюсной и экваториальной границами овала увеличивается примерно в два раза от 0.06 нПа/град до 0.12 нПа/град.



**Рисунок 4.** Давление плазмы на границах высыпаний (верхняя панель) и широтное положение границ высыпаний (нижняя панель) при разных значениях  $P_{sw}$  в зависимости от динамического давления солнечного ветра.

## 5. Заключение

Основные результаты исследований можно сформулировать следующим образом.

1. При всех уровнях магнитной активности давления плазмы на границах авроральных высыпаний почти линейно возрастает с ростом динамического давления солнечного ветра ( $P_{sw}$ ).

2. При низком уровне магнитной активности  $|AL| < 200$  нТл изменение  $P_{sw}$  от 1.0 до 7.0 нПа сопровождается увеличением давления на границах  $B_{eq}$  и  $B_{pol}$  примерно от 0.3 до 1.3 нПа и от 0.1 до 0.3 нПа, соответственно. Давление плазмы увеличивается и на границе  $B_{ps}$  соответственно от  $\sim 0.16$  нПа до  $\sim 0.70$  нПа.

3. Получено широтное положение границ высыпаний и давление плазмы на границах в периоды всех фаз среднестатистической суббури. Показано, что значительное увеличение давления на границах высыпаний наблюдается уже в период фазы зарождения суббури. На экваториальной границе высыпаний  $B_{eq}$  давление плазмы остается на высоком уровне в период всей фазы развития суббури.

4. Исследовано давление плазмы и поведение границ высыпаний в исключительно магнитоспокойные периоды ( $AL = -18$  нТл, ММП  $B_z = +1.4$  нТл). Показано, что с увеличением динамического давления наблюдается не только значительный рост давления плазмы на границах авроральных высыпаний, но и изменение широтного положения самих границ. С ростом  $P_{sw}$  широта границы  $B_{pol}$  увеличивается, в то время как широта границ  $B_{ps}$  и  $B_{eq}$  уменьшается. Несмотря на значительное расширение области высыпаний, широтный градиент давления между границами овала увеличивается примерно в два раза от 0.06 нПа/град до 0.12 нПа/град.

**Благодарности.** Данные спутника DMSP 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/>. Работа Воробьева В.Г. и Ягодкиной

О.И. поддержана Программой Президиума РАН № 28 «Космос: исследования фундаментальных процессов и их взаимосвязей»

## Литература

- Антонова Е.Е., Воробьев В.Г., Кирпичев И.П., Ягодкина О.И. Сравнение распределения давления плазмы в экваториальной плоскости и на малых высотах в магнитоспокойных условиях // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 54. № 3. С. 300–303. 2014. doi 10.7868/S001679401403002X
- Newell P.T., Feldstein Y.I., Galperin Yu.I., Meng C.-I. Morphology of nightside precipitation // J. Geophys. Res. V.101. No. A5. P. 10737-10778. 1996. doi 10.1029/95JA03516
- Vorobjev V.G., Yagodkina O.I., Katkalov Y. Auroral Precipitation Model and its applications to ionospheric and magnetospheric studies // J. Atmos. S.-Terr. Phys. V. 102. P. 157-171. 2013. doi 10.1016/j.jstp.2013.05.007
- Tsyganenko N. A., Mukai T. Tail plasma sheet models derived from Geotail particle data // J. Geophys. Res. V. 108. No. A3. 1136. 2003. doi 10.1029/2002JA009707
- Воробьев В.Г., Ягодкина О.И., Антонова Е.Е. Особенности планетарного распределения ионных высыпаний при разных уровнях магнитной активности // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 55. № 5. С. 611–622. 2015. doi 10.7868/S0016794015050193
- 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
- Старков Г.В., Реженов Б.В., Воробьев В.Г., Фельдштейн Я.И. Планетарное распределение авроральных высыпаний и их связь с областями аврорального свечения // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 43. № 5. С. 609–619. 2003.