

DOI: 10.51981/2588-0039.2024.47.015

ШИРОТНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НОЧНЫХ АВРОРАЛЬНЫХ ВЫСЫПАНИЙ В ПЕРИОДЫ НАЧАЛА СУББУРЬ

В.Г. Воробьев¹, О.И. Ягодкина¹, Е.Е. Антонова^{2,3}, И.П. Кирпичев³

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. В работе рассмотрены широтные профили характеристик авроральных высыпаний на высотах ионосферы, полученные по наблюдениям спутника DMSP F7, и радиальное распределение ионного давления в экваториальной плоскости по данным спутников миссии THEMIS в спокойные периоды и в моменты близкие к авроральному брейккапу. Определены средние широтные профили ионного давления на низких высотах и проведено их сопоставление с усредненными распределениями давления в экваториальной плоскости при близких средних значениях параметров солнечного ветра и геомагнитной активности. Показано, что, если в спокойных геомагнитных условиях максимум давления на низких высотах проецируется на геоцентрические расстояния в $\sim 7-8 R_E$, то перед началом фазы развития суббури он проецируется на расстояние $\sim 5-6 R_E$. Проведены оценки яркости аврорального свечения в эмиссии 557.7 нм, рассчитанные по наблюдениям средней энергии и потока энергии высыпавшихся электронов спутником F7.

1. Введение

Широтное распределение потоков высыпавшихся электронов и ионов в авроральной зоне крайне изменчиво и зависит как от состояния межпланетной среды, так и от уровня возмущенности магнитосферы и ионосферы. Усредненные характеристики авроральных высыпаний по данным DMSP могут дать некоторое представление об особенностях широтного распределения высыпаний в различных геофизических ситуациях. Для получения средних характеристик высыпаний необходимо выделить некую особую или реперную черту высыпаний, которую можно было бы определить в каждом пересечении спутником авроральной зоны и относительно которой с физической точки зрения целесообразно было бы определять характеристики высыпаний. Такой реперной точкой на широтном профиле высыпаний может быть широта границы $b2i$, [Newell et al., 1996], на которой наблюдается максимум потока высыпавшихся ионов с энергией 0.3 - 30 кэВ. Положение границы $b2i$ вблизи полуночи близко совпадает (коэффициент корреляции $r = 0.92$) с положением границы изотропизации (ГИ) ионов с энергией ~ 30 кэВ [Newell et al., 1998]. Считается, что широта этой границы характеризует вытянутость магнитных силовых линий ночной магнитосферы в антисолнечном направлении. Такую вытянутость обычно связывают с ростом поперечных токов хвоста магнитосферы во время предварительной фазы суббури, но она может быть обусловлена также и ростом частичного кольцевого тока.

Авроральные высыпания, регистрируемые спутниками DMSP на широтах выше $b2i$, характеризуются как изотропные. В условиях магнитоэстатического равновесия в изотропной плазме ее характеристики остаются постоянными вдоль силовой линии геомагнитного поля. Таким образом, с одной стороны, можно получить характеристики магнитосферной плазмы, проектируя данные, полученные на высотах ионосферы в экваториальную плоскость магнитосферы с использованием какой-либо модели магнитного поля. С другой стороны, условие равенства характеристик ионов в ионосфере и магнитосфере позволяет проецировать широтные профили авроральных высыпаний, полученные на высотах ионосферы, в экваториальную плоскость магнитосферы без использования каких-либо моделей магнитного поля методом "морфологического проецирования" в соответствии с классификацией [Paschmann et al., 2002].

Целью настоящей работы является изучение широтного распределения характеристик ночных авроральных высыпаний в спокойные периоды и в периоды начала магнитосферных суббурь, изучение пространственного распределения и динамики протонных и электронных высыпаний в период фазы зарождения суббури и определение методом «морфологического проецирования» области локализации аврорального брейккапа в экваториальной плоскости магнитосферы.

2. Данные и методика

Для анализа характеристик авроральных высыпаний использовались данные спутника DMSP F7 в 3-х часовом интервале 21:00- 24:00 MLT. Спутник имел почти круговую полярную орбиту с высотой ~835 км и периодом обращения ~101 мин. Каждую секунду спутник регистрировал спектр высыпающихся частиц в диапазоне энергий от 32 эВ до 30 кэВ в 19-и каналах, распределенных по энергиям в логарифмической последовательности.

В качестве первичного материала в работе использована база данных спутника DMSP F7 за 1986 г. Кроме характеристик высыпающихся частиц и сведений об уровне магнитной активности, база данных для каждого пролета спутника через зону авроральных высыпаний содержит необходимые для целей настоящего исследования сведения о фазах магнитной суббури. Каждая из фаз суббури дополнительно разбиты на три равные по временному интервалу подфазы, соответствующие начальной, средней и заключительной стадии каждой из фаз. Для каждого индивидуального пересечения спутником авроральной зоны, выбранного из соответствующей категории базы данных, состояние геомагнитной активности и фазы магнитосферной суббури определялись дополнительно детальным анализом 1-мин значений AL-, SYM/H - и PC – индексов магнитной активности. Вариации Vz-компоненты ММП и динамического давления солнечного ветра Psw также использовались при наличии соответствующих данных на страницах OMNI Web (<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>).

При анализе характеристик авроральных частиц по данным спутника F7, кроме их средних энергий и потоков энергии, для высыпающихся ионов использованы значения ионного давления (Pi), а для высыпающихся электронов I₅₅₇₇ - интенсивность свечения в эмиссии (OI) 557.7 нм. Методика определения ионного давления по измерениям спутников DMSP опубликована в работе [Stepanova et al., 2006]. При расчете интенсивности свечения эмиссии (OI) 557.7 нм принимались во внимание процессы образования электронно-возбужденного атома O(¹S) в результате переноса энергии возбуждения из метастабильного состояния N₂(A³Σ_u⁺), возбуждение O(³P) первичными и вторичными электронами и диссоциативная рекомбинация.

3. Характеристики ночных авроральных высыпаний в магнитоспокойные периоды

К спокойным периодам были отнесены пролеты спутника, наблюдаемые при низком уровне магнитной активности (AL > -100 нТл) и при отсутствии магнитных вариаций амплитудой более 50 нТл во временном интервале примерно 2 ч до и после регистрации спутником высыпаний авроральной зоны. Такой детальный анализ позволяет отделить «истинно» магнитоспокойные периоды от интервалов с низким уровнем магнитной активности, но относящимся в фазе зарождения суббури или к интервалам незначительного роста магнитной активности, обусловленных кратковременными поворотами на юг Vz-компоненты ММП.

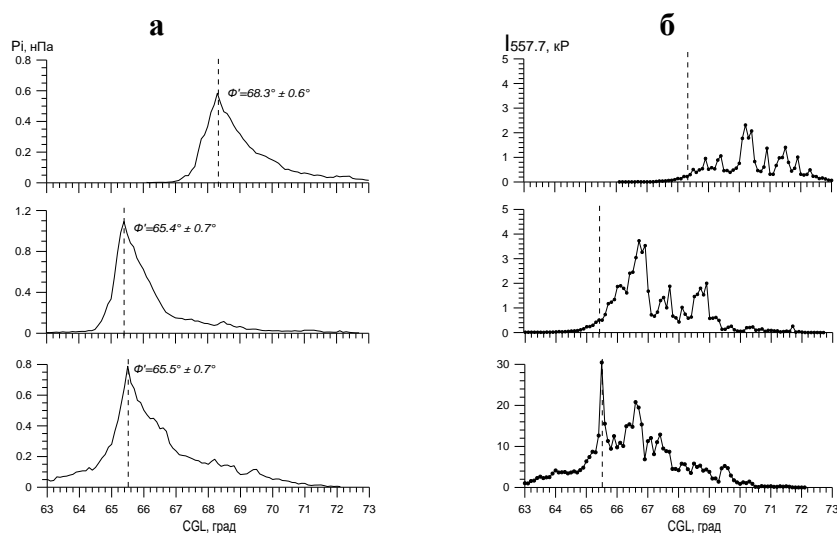


Рисунок 1. Средние широтные распределения ионного давления (а) и интенсивности свечения эмиссии 557.7 нм (б) в периоды различных фаз суббури: верхняя панель – магнитоспокойный период, средняя панель – заключительная стадия фазы зарождения, нижняя панель – начальная стадия фазы развития суббури.

Среднее широтное распределение ионного давления в спокойные периоды показано на верхней панели рис. 1а. Кривая получена методом наложения эпох относительно $b2i$, средняя широта которой в спокойные периоды составляет $\Phi' = 68.3^\circ \pm 0.6^\circ$ CGL и обозначена вертикальной штриховой линией. Средние значения индексов магнитной активности и параметров межпланетной среды в периоды пролетов спутника указывают на очень низкий уровень геомагнитной активности: $\langle AL \rangle = -12$ нТл, $\langle Dst \rangle = -2$ нТл, $\langle IMF Bz \rangle = +2.3$ нТл и $\langle Psw \rangle = 2.5$ нПа.

Значение средней энергии высыпающихся электронов в диапазоне энергий 1-10 кэВ слабо влияет на уровень свечения эмиссии 557.7 нм, поэтому широтный ход эмиссии примерно соответствует широтному распределению потока энергии высыпающихся электронов. Согласно верхней панели рис. 1б, электронные высыпания регистрируются даже в «экстремально» спокойные периоды. Сияния наблюдаются к полюсу от границы $b2i$ на широтах примерно $68^\circ - 72^\circ$ CGL. Свечение в этот период можно отнести к субвизуальным или очень слабым полярным сияниям, исключая довольно резкие локальные увеличения потока энергии высыпающихся электронов на широтах $70^\circ - 72^\circ$ CGL, которые, по всей вероятности, связаны с дугами сияний спокойного аврорального овала.

Широтное распределение характеристик высыпаний в спокойные периоды получено усреднением данных по 20 пролетам спутника через зону высыпаний. Увеличение числа пролетов спутника для получения средних характеристик не приводит к существенному изменению широтного профиля ионного давления. Однако в области дискретных электронных высыпаний приведет к сильному сглаживанию потоков энергии высыпающихся электронов и, соответственно, к уменьшению средних значений яркости свечения.

4. Характеристики авроральных высыпаний в периоды до и после начала фазы развития суббури

Среднее распределение ионного давления в заключительную стадию фазы зарождения суббури, примерно в интервале 15-и мин до начала фазы развития (T_0) показано на средней панели рис. 1а. Широтное распределение ионного давления получено усреднением данных по 18 пролетам спутника через зону высыпаний. Средние параметры магнитной активности и межпланетной среды в этих пролетах спутника составляют: $\langle AL \rangle = -65$ нТл, $\langle Bz \text{ ММП} \rangle = -1.4$ нТл, $\langle Psw \rangle = 3.3$ нПа. Рисунок показывает, что по отношению к спокойным условиям в период фазы зарождения суббури граница $b2i$ сместилась к экватору и перед самым началом фазы развития суббури в среднем располагается на широте $\Phi' = 65.4^\circ \pm 0.7^\circ$ CGL. Величина ионного давления на $b2i$ увеличивается от $\langle Pi \rangle = (0.6 \pm 0.1)$ нПа в спокойные периоды до $\langle Pi \rangle = (1.1 \pm 0.1)$ нПа в заключительную стадию фазы зарождения.

Среднее широтное распределение ионного давления в начальный период фазы развития суббури иллюстрирует нижняя панель рис. 1а. Усреднение проводилось по 16 пролетам F7, которые проходили в первую треть общего периода фазы развития суббури, что соответствует интервалу ~ 15 мин, учитывая, что сам момент T_0 по магнитным данным определяется с точностью в несколько мин. Рисунок демонстрирует, что широтное положение границы $b2i$ до и после начала фазы развития суббури фактически не изменилось и составляет $\Phi' = 65.4^\circ \pm 0.7^\circ$ CGL, но величина ионного давления уменьшилась до $\langle Pi \rangle = (0.8 \pm 0.1)$ нПа, возможно, из-за возрастания после начала фазы развития суббури продольного тока, приводящего к увеличению продольной разности потенциалов, росту электронных высыпаний и торможению ионных высыпаний.

Широтные характеристики электронных высыпаний представлены на рис. 1б. Рисунки иллюстрируют средние широтные профили свечения эмиссии 557.7 нм, полученные по наблюдениям средних энергий и потоков энергии высыпающихся электронов в соответствующих рис. 1а пролетах спутника F7. В целом, рис. 1б показывает, что основные электронные высыпания регистрируются в области изотропных высыпаний к полюсу от $b2i$. К экватору от $b2i$ до начала фазы развития суббури (средняя панель рис. 1б) существует очень узкая $\sim 0.5^\circ$ широты область слабого субвизуального диффузного свечения. После начала фазы развития суббури (нижняя панель рис. 1б) яркость свечения экваториальнее $b2i$ увеличивается до 4-8 кР, а ширина области свечения до $\sim 2^\circ$ широты.

5. Проекция границы $b2i$ в экваториальной плоскости магнитосферы

В изотропной плазме в условиях магнитоэлектростатического равновесия давление плазмы остается постоянными вдоль всей силовой линии геомагнитного поля, исключая области продольного ускорения электронов. Это открывает возможность использовать условие равенства ионного давления, полученного по данным низковысотных спутников, и измерения ионного давления в экваториальной плоскости магнитосферы для проецирования ионосферных данных в экваториальную плоскость без обращения к каким-либо моделям

геомагнитного поля. Положение $b2i$ в ионосфере близко к положению максимума измеряемого спутником ионного давления, а её широта указывает наиболее экваториальную часть ионосферы, ионное давление в которой можно проецировать в экваториальную магнитосферу.

Для определения радиального распределения ионного давления в магнитосфере были использованы наблюдения спутников миссии THEMIS. Профиль ионного давления на рис. 2а (верхняя панель) получен для магнитоспокойных условий ($AL > -200$ нТл, V_z ММП = 2.0 ± 1.0 нТл). На нижней панели рис. 2а показан профиль ионного давления при спокойных условиях, но при отрицательных значениях V_z -компоненты ММП, в условиях, наиболее близких к фазе зарождения суббури.

Результаты морфологического проецирования (тонкая сплошная кривая) и сопоставления с радиальным профилем давления по данным THEMIS (кривая с точками) представлены на рис. 2б. Верхняя горизонтальная шкала на рисунке показывает исправленные геомагнитные широты, а нижняя – радиальное расстояние, на которое эти широты проектируются в экваториальную плоскость магнитосферы. Вертикальными штриховыми линиями на рис. 2б отмечено положение границы $b2i$.

Рисунок 2б (верхняя панель) показывает, что в магнитоспокойных условиях граница $b2i$ проектируется в экваториальную плоскость на расстояния ~ 7.5 Re. Рис. 2б (нижняя панель) показывает сравнение профилей давления в заключительную стадию фазы зарождения суббури. Из этого рисунка следует, что по сравнению со спокойным периодом в фазу зарождения суббури граница $b2i$ смещается к экватору и регистрируется на расстоянии около 5 Re перед началом фазы развития суббури. Отрезками жирной сплошной линии на горизонтальной шкале рис. 2б показан интервал расстояний, соответствующий среднеквадратичной ошибке вычисления среднего ионного давления.

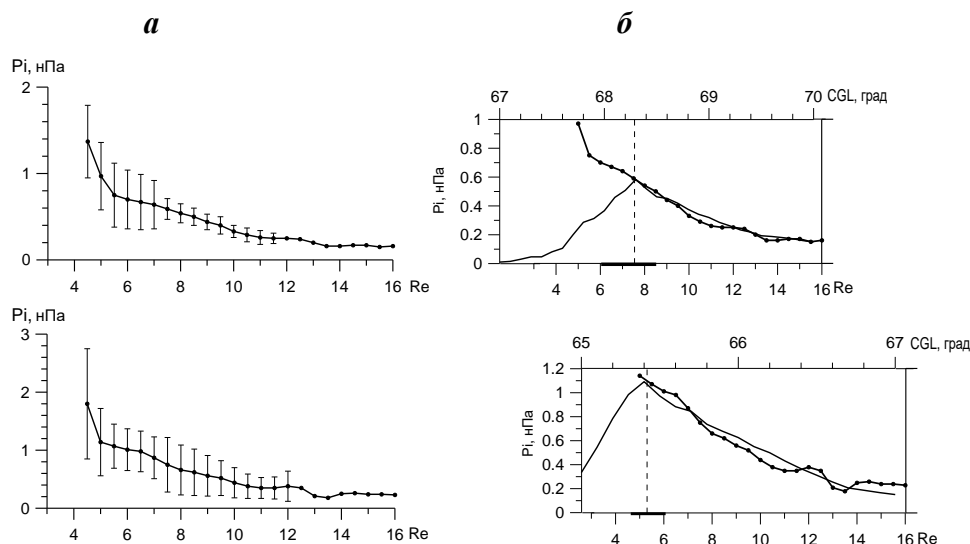


Рисунок 2. Радиальное распределение ионного давления в экваториальной плоскости (а). Проецирование широтного профиля ионного давления в ионосфере в экваториальную плоскость магнитосферы в спокойные периоды. Верхняя панель – положительная полярность V_z ММП, нижняя панель – отрицательная полярность V_z ММП.

6. Основные результаты работы

Наблюдения спутника F7 в секторе 21:00-24:00 MLT использованы для определения средних характеристик высыпавшихся электронов и ионов. Получены средние широтные профили ионного давления и аврорального свечения на высотах ионосферы. Для определения среднего радиального распределения ионного давления в экваториальной плоскости магнитосферы были использованы наблюдения спутников миссии THEMIS. Проведено сравнение широтного распределения давления плазмы на высотах ионосферы с давлением плазмы в экваториальной плоскости. Основные результаты:

1. По наблюдениям спутников THEMIS получены средние радиальные профили давления плазмы в предполуденном секторе в магнитоспокойных условиях и в периоды по параметрам межпланетной среды и уровню геомагнитной активности наиболее близко соответствующие фазе зарождения суббури.

2. Сопоставление ионного давления в ионосфере с давлением в экваториальной плоскости указывает на то, что в магнитоспокойных условиях граница $b2i$ проецируется на геоцентрическое расстояние ~ 7.5 Re. По

сравнению со спокойным периодом в фазу зарождения суббури граница $b2i$ смещается к Земле на более близкие расстояния до 5-6 Re.

3. Показано, что в спокойные периоды и перед началом суббури сияния регистрируются в области изотропных высыпаний к полюсу от границы $b2i$. В начальный период фазы развития суббури статистически показано существование локального, узкого, четко выраженного пика электронных высыпаний на границе $b2i$, ассоциируемого с яркой дугой сияния со средней интенсивностью в зеленой линии $I_{557.7} \sim 30$ кРл.

Положение максимально яркой дуги сияния после начала фазы развития суббури на границе $b2i$, по-видимому, свидетельствует о том, что авроральный брейкап начинается в области максимального ионного давления на ионосферных высотах. Полученные результаты дают основание предположить, что область аврорального брейкапа проецируется в магнитосферу Земли на геоцентрические расстояния $\sim 5-6$ Re.

Исследования, выполненные Воробьевым В.Г., поддержаны фондом РФФИ (проект 22-12-20017).

Данные спутника DMSP F7 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

- Newell P.T., Feldstein Ya.I., Galperin Y.I., Meng S.-I. The morphology of nightside precipitation // J. Geophys. Res. V. 101. No. A5. P. 10737-10748. 1996. Doi:10.1029/95JA03516
- Paschmann G., Haaland S., Treumann R. Auroral plasma physics // Space Sci. Rev. V. 103. P. 1-485. 2002. Doi:10.1023/A:1023030716698
- 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