

НОЧНЫЕ АВРОРАЛЬНЫЕ ВЫСЫПАНИЯ ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УРОВНЯХ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ

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

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. Исследованы характеристики ночных авроральных высыпаний и аврорального свечения в условиях экстремально низкой и экстремально высокой магнитосферной активности. Использовались данные спутников серии DMSP и алгоритмы расчета величины ионного давления и интегральной интенсивности свечения эмиссии (OI) 557.7 нм. Определены усредненные широтные профили ионного давления и интенсивности аврорального свечения в магнитоспокойные периоды и во время больших магнитных бурь. Представлено уравнение регрессии, связывающее исправленную геомагнитную широту экваториальной границы высыпаний с уровнем магнитной активности и уравнение регрессии, позволяющее оценить величину ионного давления на этой границе в зависимости от её широты. Уравнения могут быть использованы для периодов с очень высоким уровнем магнитной активности $Dst > -600$ нТл и $AL > -2000$ нТл.

1. Введение

В полуночном секторе авроральной зоны при очень низком уровне магнитной активности сияния регистрируются на исправленных геомагнитных широтах $\Phi' \sim 70^\circ - 72^\circ$ CGL, в то время как при высоком уровне магнитной активности сияния наблюдаются в большом интервале широт от $\sim 60^\circ$ CGL до $\sim 74^\circ$ CGL. Здесь в качестве широтного интервала представлены размеры овала полярных сияний по данным работы (Feldstein and Starkov, 1967) при индексах магнитной активности в авроральной зоне $Q=0$ и $Q=8$ соответственно. При $Q=8$ в европейской части территории России экваториальная граница овала сияний будет располагаться примерно на широтах г. Архангельска. Однако хорошо известно, что в периоды интенсивных магнитных бурь полярные сияния наблюдались в средних и даже низких широтах.

Во время магнитных бурь происходит развитие кольцевого тока, мерой интенсивности которого может служить величина Dst индекса. Влияние кольцевого тока (DR) на положение границ овала сияний впервые было отмечено в работе (Feldstein and Starkov, 1968). Авторами этой работы было показано, что с увеличением интенсивности DR экваториальная граница овала сияний при фиксированных значениях Q – индекса смещается к экватору. В работе (Старков, 1993) представлено уравнение регрессии, связывающее широту экваториальной границы дискретных форм сияний с величиной логарифма Dst -индекса.

Положение границ овала сияний можно определить не только по оптическим наблюдениям аврорального свечения, но и по измерениям характеристик высыпавшихся частиц на низковысотных спутниках. В работе (Vorobjev et al., 2013) представлена эмпирическая модель авроральных высыпаний (APM), полученная по наблюдениям спутников серии DMSP, которая показывает планетарное распределение различных областей электронных высыпаний и их средние характеристики в зависимости от уровня магнитной активности, выраженной величинами AL - и Dst -индексов. Однако применимость модели ограничена магнитными возмущениями с $|AL| < 1500$ нТл и $|Dst| < 200$ нТл, в области которых положение границ высыпаний определено по статистически значимому набору данных.

Целью настоящей работы является изучение структуры ночных авроральных высыпаний в экстремально магнитоспокойные и экстремально магнитовозмущенные периоды и исследование особенностей широтного профиля характеристик электронных и ионных высыпаний в такие периоды. Определено положение экваториальной границы области авроральных высыпаний в периоды сильных магнитных бурь и средняя величина ионного давления на этой границе.

2. Данные и методика

Для анализа характеристик авроральных высыпаний использовались данные спутников DMSP F7 и F9 в долготном интервале 21:00 - 24:00 MLT. Спутники имели почти круговую полярную орбиту с высотой ~ 840 км и периодом обращения ~ 101 мин. Каждую секунду на спутниках регистрировался спектр высыпавшихся частиц в диапазоне энергий от 0.3 кэВ до 30 кэВ в 19-и каналах, распределенных по энергиям в логарифмической последовательности. Данные спутников взяты на страницах <http://sd-www.jhuapl.edu>.

При анализе характеристик авроральных частиц, кроме их средних энергий и потоков энергии, для высыпающихся ионов использованы значения ионного давления, а для высыпающихся электронов интенсивность свечения в эмиссии (OI) 557.7 нм. Методика определения ионного давления (P_i) по измерениям спутников DMSP была опубликована в работе (Stepanova et al., 2006). Алгоритм расчета интегральной интенсивности свечения эмиссии (OI) 557.7 нм представлен в работе (Воробьев и др., 2013). В качестве входных параметров использовались средняя энергия и интегральный поток энергии высыпающихся частиц, представленные на страницах <http://sd-www.jhuapl.edu>.

3. Сравнительные характеристики высыпаний при низком и высоком уровне магнитной активности

Для изучения широтных профилей ионных и электронных высыпаний в периоды возмущений использованы наблюдения спутника F7 в период сильной магнитной бури 07-09 февраля 1986 г. с $Dst = -307$ нТл в максимуме бури и данные спутника F9 в период гигантской магнитной бури 13-14 марта 1989 г. с $Dst = -589$ нТл в максимуме возмущения. Характеристики авроральных высыпаний в спокойные периоды были получены спутниками F7 и F9 за сутки до начала поименованных выше магнитных бурь и по данным спутника F7 в экстремально спокойные периоды 1986 г., известного как год спокойного Солнца в минимуме 21 цикла солнечной активности.

Анализ спутниковых данных показывает, что широтное распределение характеристик высыпающихся электронов и ионов в авроральной зоне крайне изменчиво и зависит как от состояния межпланетной среды, так и от уровня возмущенности магнитосферы и ионосферы. Определенные сведения об особенностях широтного распределения высыпаний в различных геофизических ситуациях могут дать их средние характеристики, полученные спутниками DMSP в разные периоды времени, но при сходных геомагнитных условиях. Для получения средних характеристик 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 определять характеристики высыпаний. В качестве такой реперной точки на широтном профиле высыпаний взята широта экваториальной границы изотропных высыпаний (ГИВ).

Широтные профили ионного давления (P_i) имеют хорошо выраженный максимум как в спокойных условиях, так и в период экстремально сильных геомагнитных возмущений, формирование которого можно понять из следующих соображений. С уменьшением радиального расстояния величина ионного давления в экваториальной плоскости магнитосферы естественным образом возрастает по мере увеличения плотности плазмы. Однако при некотором приближении к Земле плазма становится анизотропной, резко увеличивается поперечная компонента ионного давления и падает его продольная составляющая. Так как спутник регистрирует только высыпающиеся частицы, т.е. продольную составляющую P_i , в широтном профиле давления формируется четко выраженный максимум, который можно рассматривать как экваториальную границу изотропных высыпаний (ГИВ).

Средние широтные распределения ионного давления (P_i) и интенсивности свечения (I_{5577}) в спокойные периоды показаны на верхней панели рис. 1. К спокойным периодам были отнесены пролеты спутника F7, 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. Кривые получены методом наложения эпох относительно ГИВ и приполюсной границы высыпаний b_b по 20 пролетам спутника. Широтный профиль ионного давления показан на верхней панели рис. 1а. Средние значения индексов Dst и AL указывают на очень низкий уровень геомагнитной активности для отобранных событий: $\langle AL \rangle = -12$ нТл, $\langle Dst \rangle = -2$ нТл. Положение ГИВ отмечено на рис. 1 штриховыми вертикальными линиями. В экстремально спокойные периоды средняя широта ГИВ составляет $\Phi' = 68.3^\circ \pm 0.6^\circ$ CGL, а средняя величина ионного давления в максимуме ~ 0.6 нПа.

На рис. 1б горизонтальные штриховые линии определяют примерную границу между субвизуальным и визуальным авроральным свечением. Свечение в магнитоспокойный период можно отнести к субвизуальным или очень слабым полярным сияниям с возможными резкими локальными увеличениями интенсивности на широтах выше ГИВ, которые могут быть связаны с дугами полярных сияний интенсивностью до нескольких кР.

На нижней панели рис. 3 представлены средние широтные профили P_i и I_{5577} в экстремально возмущенные периоды магнитной бури 13-14 марта 1989 г. Для построения средних широтных профилей были отобраны пролеты спутника F9, в период которых ГИВ регистрировалась на $\Phi' \leq 55^\circ$ CGL. Таких пролетов оказалось десять при среднем уровне $\langle AL \rangle = -790$ нТл и $\langle Dst \rangle = -320$ нТл.

Широтные профили P_i и I_{5577} на верхней и нижней панелях рисунка построены в одном и том же интервале широт и ясно указывают на значительное экваториальное смещение ГИВ от $\Phi' = 68.3^\circ$ CGL в экстремально спокойные периоды до $\Phi' = 52.9^\circ \pm 1.2^\circ$ CGL в период магнитной бури. Величина максимума ионного давления также значительно увеличивается в период магнитной бури по сравнению со спокойным периодом и в среднем составляет $P_i \sim 10$ нПа. Широта приполюсной границы высыпаний в период магнитной бури

испытывает значительные вариации от $\sim 62^\circ$ CGL до $\sim 80^\circ$ CGL при среднем значении широты $\langle \Phi' \rangle \sim 71^\circ$ CGL, что соответствует данным модели APM для такого среднего уровня магнитной активности.

Широтное распределение интенсивности аврорального свечения в период магнитной бури неоднородно (рис. 1б, нижняя панель). Полярные сияния яркостью в 10-12 кР регистрируются в экваториальной части высыпаний на широтах от ГИВ до $\sim 60^\circ$ CGL в области больших отрицательных градиентов ионного давления. Выше по широте, после некоторого «провала» интенсивности свечения шириной 6° - 8° широты, локальные всплески интенсивности свечения наблюдались около приполюсного края зоны авроральных высыпаний.

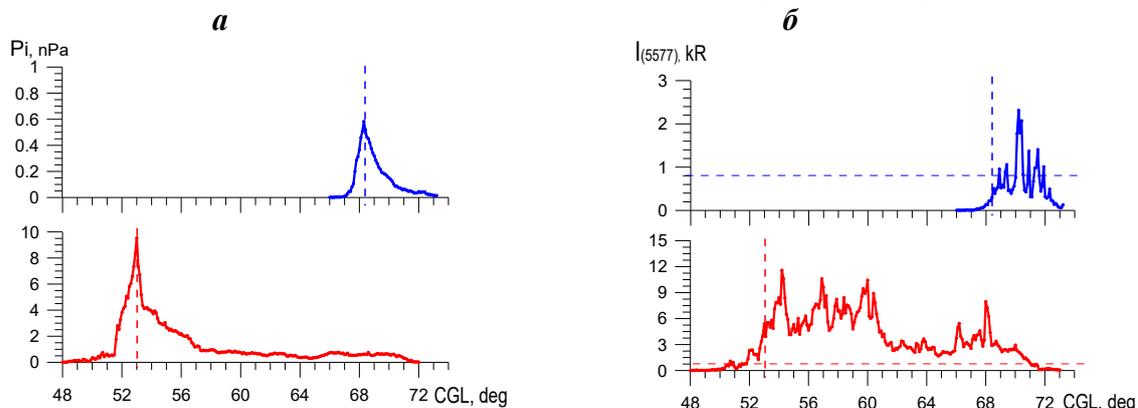


Рисунок 1. Средние широтные распределения ионного давления (а) и интенсивности свечения эмиссии 557.7 нм (б) в экстремально спокойных (верхняя панель) и экстремально возмущенных (нижняя панель) условиях. Вертикальные штриховые линии - широтное положение ГИВ.

4. Положение ГИВ и величина ионного давления

Планетарное распределение границ авроральных высыпаний, регистрируемых спутниками серии DMSP, в зависимости от уровня геомагнитной активности представлено в модели APM (Vorobjev et al., 2013). Для широты ГИВ уравнение регрессии, полученное в этой модели, имеет вид:

$$\Phi'_{\text{ГИВ}} = 66.46 - 0.0055|AL| - 5.43 \times 10^{-7}AL^2 + 0.026 \text{ Dst}, \quad (1)$$

где Φ' - исправленная геомагнитная широта в градусах, а AL и Dst – значения индексов магнитной активности в нТл.

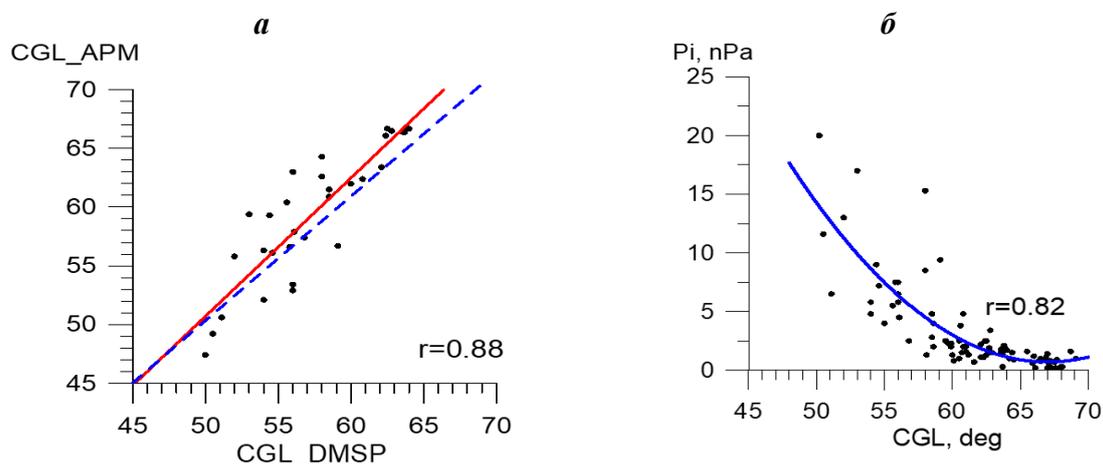


Рисунок 2. (а) - широтное положение ГИВ по наблюдениям спутников DMSP F7 и F9 и по модели авроральных высыпаний (APM) для магнитных бурь 07-09 февраля 1986 г. и 13-14 марта 1989 г.

(б) - величина максимума ионного давления в зависимости от исправленной геомагнитной широты ГИВ.

Рис. 2а показывает соотношение между экспериментальными и расчетными значениями положения ГИВ в секторе 21-24 MLT. На рисунке по горизонтальной оси отложена исправленная геомагнитная широта границы, зарегистрированная спутниками F7 и F9 в период магнитных бурь, а по горизонтальной оси – широта этой границы, рассчитанная по формуле (1) для тех же уровней магнитной активности. Полученные соотношения хорошо аппроксимируются уравнением линейной регрессии (сплошная линия) с

коэффициентом линейной корреляции $r = 0.88$. Штриховая линия на рисунке соответствует уравнению $Y=X$, т.е. когда расчетные и экспериментальные значения точно совпадают друг с другом. Как видно из рисунка, линейные соотношения очень близки друг к другу. Результаты, представленные на рис. 2а, показывают, что аналитическое выражение (1) может быть использовано для определения положения ГИВ в секторе 21:00-24:00 MLT в периоды очень сильных магнитных бурь, по крайней мере, для $Dst > -600$ нТл и $AL > -2000$ нТл.

Анализ данных показывает, что не только широта ГИВ, но и величина ионного давления на этой границе зависят от уровня геомагнитной активности. Так как уровень магнитной активности является определяющим в выражении (1), определим максимальный уровень ионного давления на широтном профиле высыпаний в зависимости от широты ГИВ. Соответствующий график представлен на рис. 2б, для построения которого использованы данные спутников DMSP, как за периоды рассмотренных выше магнитных бури, так и за спокойные периоды, предшествующие этим возмущениям. С коэффициентом корреляции $r = 0.82$ наблюдения спутников можно аппроксимировать уравнением регрессии 2-ой степени:

$$P_i \text{ (нПа)} = 211.07 - 6.28 \Phi'_{\text{ГИВ}} + 0.047 (\Phi'_{\text{ГИВ}})^2 \quad (2)$$

На рис. 3 представлено семейство линейных уравнений, полученное из уравнения (1), которое показывает широту ГИВ в зависимости от уровня Dst-индекса при разных, но фиксированных значениях индекса AL. Рисунок может быть использован для быстрого определения широты максимума ионного давления в широтном профиле высыпаний и определения области, максимально подверженной влиянию геоиндуцированных токов.

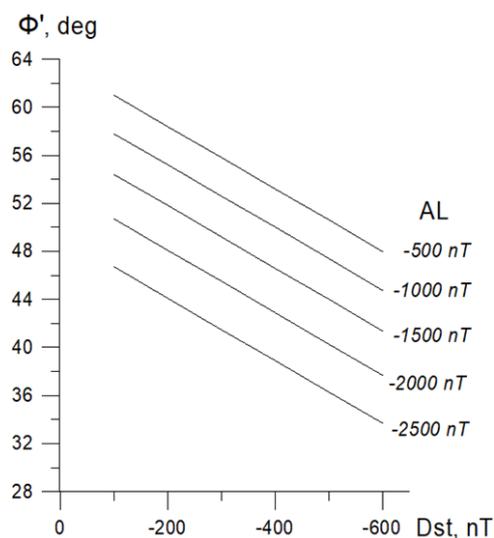


Рисунок 3. Широта ГИВ в зависимости от Dst при разных, но фиксированных значениях AL-индекса.

5. Основные результаты работы

По наблюдениям спутников серии DMSP исследованы сравнительные характеристики авроральных высыпаний в секторе 21:00 – 24:00 MLT в экстремально магнитоспокойные и экстремально магнитовозмущенные периоды. В работе получены следующие основные результаты:

1. В экстремально спокойные периоды ($\langle AL \rangle = -12$ нТл и $\langle Dst \rangle = -2$ нТл) средняя широта ГИВ составляет $\Phi' = 68.3^\circ \pm 0.6^\circ$ CGL, а средняя величина ионного давления в максимуме ~ 0.6 нПа.

2. В периоды магнитных бурь положение ГИВ значительно смещается в более низкие широты до $\Phi' = 52.9^\circ \pm 1.2^\circ$ CGL при среднем уровне индексов магнитной активности $AL = -790$ нТл и $Dst = -320$ нТл, средняя величина ионного давления на этой границе значительно увеличивается по сравнению со спокойным периодом и в среднем составляет $P_i \sim 10$ нПа.

3. Представлено уравнение регрессии, связывающее исправленную геомагнитную широту ГИВ с уровнем магнитной активности, и уравнение регрессии, позволяющее оценить величину ионного давления на этой границе. Уравнения могут быть использованы для периодов с очень высоким уровнем магнитной активности, по крайней мере для $Dst > -600$ нТл и $AL > -2000$ нТл.

Исследования, выполненные О.И. Ягодкиной, поддержаны грантом РФФИ № 25-17-20038 <https://rscf.ru/project/25-17-20038> и грантом Министерства образования и науки Мурманской области.

Литература

- Воробьев В.Г., Кириллов А.С., Каткалов Ю.В., Ягодкина О.И. Планетарное распределение интенсивности аврорального свечения, полученное с использованием модели авроральных высыпаний // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 53. № 6. С. 757–761. 2013. <https://doi.org/10.7868/S0016794013060163>
- Старков Г.В. Планетарная морфология сияний // Магнитосферно-ионосферная физика. Краткий справочник. Ред. Ю.П. Мальцев. С-Пб. Наука. 184 с. 1993.
- Feldstein, Y.I.; Starkov, G.V. Dynamics of auroral belt and polar geomagnetic disturbances // Planet. Space Sci. V. 15. No. 2. P. 209–229. 1967. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(67\)90190-0](https://doi.org/10.1016/0032-0633(67)90190-0)
- Feldstein, Y.I.; Starkov, G.V. Auroral oval in the IGY and IQSY period and a ring current in the magnetosphere // Planet. Space Sci. V. 16. No. 1. P. 129–133. 1968. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(68\)90050-0](https://doi.org/10.1016/0032-0633(68)90050-0)
- 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. <https://doi.org/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. Issue (September). P. 157–171. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2013.05.007>