

УДК 550.338.1

ШИРОТНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НОЧНЫХ АВРОРАЛЬНЫХ ВЫСЫПАНИЙ В СПОКОЙНЫЕ ПЕРИОДЫ И В ПЕРИОДЫ НАЧАЛА СУББУРЬ

© 2025 г. В. Г. Воробьев^{1, *}, О. И. Ягодкина^{1, **}, Е. Е. Антонова^{2, 3, ***},
И. П. Кирпичев^{3, ****}

¹Полярный геофизический институт (ПГИ), Апатиты (Мурманская обл.), Россия

²Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (НИИЯФ МГУ), Москва, Россия

³Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), Москва, Россия

*e-mail: vorobjev@pgia.ru

**e-mail: oksana41@mail.ru

***e-mail: elizaveta.antonova@gmail.com

****e-mail: ikir@iki.rssi.ru

Поступила в редакцию 19.05.2024 г.

После доработки 06.09.2024 г.

Принята к публикации 26.09.2024 г.

К нерешенным проблемам физики авроральных суббурь относится вопрос о локализации и механизме начала взрывной фазы суббури. Новая информация, необходимая для решения данной проблемы, может быть получена в результате сопоставления результатов наблюдений низковысотных спутников с наблюдениями в экваториальной плоскости магнитосферы. Для этого был использован метод морфологического проецирования, не требующий знаний о конфигурации магнитного поля. 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 магнитоспокойные периоды и в моменты, близкие к авроральному брейкапу. Особое внимание уделялось положению максимума потока энергии ионных высыпаний с энергией более 3 кэВ (граница $b2i$) и профилям давления ионов. 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 $\sim 7\text{--}8 R_e$, то перед началом фазы развития суббури он проецируется на расстояние $\sim 5\text{--}6 R_e$. Получены средние значения максимумов давления в магнитоспокойные периоды, а также до и после начала фазы развития суббури. Проведены оценки яркости аврорального свечения в эмиссии 557.7 нм, рассчитанные по наблюдениям средней энергии и потока энергии высыпающихся электронов спутником F7.

Ключевые слова: авроральные высыпания, магнитосферная суббуря, фазы суббури, ионное давление, широтное и радиальное распределение ионного давления, яркость аврорального свечения

DOI: 10.31857/S0016794025020012, EDN: CWHJWL

1. ВВЕДЕНИЕ

Ранние исследования магнитосферных суббурь показали, что уярчение ближайшей к экватору дуги полярного сияния показывает локализацию начала взрывной фазы суббури [Akasofu, 1964]. Такие суббури обычно называют классическими

в отличие, например, от суббуревых возмущений, развивающихся на широтах выше 70° геомагнитной широты и получивших название “полярные суббури” [Клейменова и др., 2012; Деспирак и др., 2022]. Внимание к вопросу о локализации начала взрывной фазы суббури возросло в связи с исследованиями ускорения электронов внеш-

него радиационного пояса, так как суббуревые инъекции электронов рассматриваются как затравочная популяция при ускорении электронов внешнего радиационного пояса. Долгое время считалось, что инжектированные затравочные электроны потом сравнительно долго ускоряются до релятивистских энергий. Но детальный анализ в работе [Kim et al., 2023] показал, что основным механизмом ускорения электронов внешнего пояса являются суббуревые диполизации. Ранее было показано, что бездисперсионные инъекции могут быть локализованы внутри гео-стационарной орбиты (см., например, [Nosé et al., 2016, 2018]). Возникла задача уточнения локализации и механизмов начала взрывной фазы классической суббури. В работе [Vorobjev et al., 2018] было показано, что при суббурях со сравнительно большими минимальными значениями AL -индекса ($-1500 \text{ нТл} < AL_{\min} < -600 \text{ нТл}$) четко выделяется почти линейная зависимость SYM/H от модуля AL (рис. 1с данной работы), что указывает на локализацию суббурового возмущения внутри кольцевого тока. Хорошо известно, что развитие кольцевого тока является следствием увеличения давления плазмы внутри магнитосферы. Поэтому представляют интерес наблюдения динамики радиального профиля давления плазмы в магнитосфере во время подготовительной фазы суббури и более детальное изучение локализации начала взрывной фазы.

В настоящей работе проводится анализ характеристик ночных авроральных высыпаний, полученных низковысотным спутником с полярной орбитой DMSP F7 и сравнение результатов анализа распределения давления с наблюдениями вблизи экваториальной плоскости магнитосферы по данным миссии THEMIS. Полученная статистика пересечений аврорального овала спутником DMSP не позволяет пока выделить моменты пересечения области высыпаний в период аврорального брейкапа. Даже на спутниках с повышенным временным разрешением, таких как Fast и Freja, каждое такое событие является предметом отдельного специального анализа [Persson et al., 1994; Dubyagin et al., 2003; Mende et al., 2003]. Однако, наблюдения вдали от экваториальной плоскости было крайне трудно использовать для локализации начала взрывной фазы суббури, так как разработанные к тому времени популярные модели магнитного поля с фиксированной геометрией токовых систем не позволяли сравнительно точно отследить конфигурацию магнитного поля. В основном, конкурировали теории начала взрывной фазы в хвосте на геоцентрическом расстоянии $\sim 20 R_e$ в результате процессов пересоединения [Baker et al., 1996] и разрыва то-

кового слоя хвоста на расстоянии $\sim 8-10 R_e$ [Lui et al., 1996]. Для проецирования наблюдений на низколетящих спутниках использовались модели магнитного поля. В работе [Dubyagin et al., 2003] положение области начала взрывной фазы суббури было определено на геоцентрическом расстоянии в $\sim 8 R_e$, что значительно поддержало представления о начале суббури внутри магнитосферы. Этот результат был получен с использованием модели Ц-89 [Tsyganenko, 1989]. В этой работе использовались также предположение об изотропии давления p и результаты измерений положения максимума потока протонов, рассматриваемого в качестве границы изотропных высыпаний $b2i$. Была получена оценка величины давления в области брейкапа $\sim 1-2 \text{ нПа}$ вычислением радиальной компоненты силы Ампера, равной $\nabla p = [jB]$, вглубь магнитосферы, начиная от $X = -25 R_e$ в нейтральном слое на полуночном меридиане. Интегральное давление плазмы, восстановленное по данным спутника Fast, на котором измерялись потоки ионов с энергиями $0.01-24 \text{ кэВ}$ (см. верхнюю панель на рис. 4 этой работы), составляло в максимуме $\sim 0.4-0.5 \text{ нПа}$, что было значительно меньше давления, восстановленного с использованием модели Ц-89 [Tsyganenko, 1989]. Положение же максимума давления совпало с положением, полученным с использованием модели, что рассматривалось в качестве справедливости оценки локализации брейкапа на геоцентрическом расстоянии в $\sim 8 R_e$. Можно отметить, что меньшая величина определенного по спутниковым данным значения давления по сравнению с результатами вычислений, по-видимому, связана с существованием продольного (field-aligned) потенциала порядка нескольких кэВ в структуре типа перевернутого V (см. верхнюю панель рис. 3 этой же работы). Непосредственные измерения давления в экваториальной плоскости магнитосферы и измерения питч-углового распределения электронов во время уярчения дуги сияний в момент брейкапа в работе [Dubyagin et al., 2003] не проводились. Но эту работу можно считать одной из первых, в которой обращалось внимание на использования давления на магнитной силовой линии в качестве способа определения проецирования измерений на низких высотах на экваториальную плоскость.

Измерения питч-углового распределения в момент брейкапа по данным спутника Fast были приведены в работе [Mende et al., 2003] и соответствовали результатам, полученным в работе [Dubyagin et al., 2003] для близких инвариантных широт. Показано, что в момент брейкапа спутник регистрировал коллимированный пучок электронов на границе структуры типа перевер-

нутаго V. Такая особенность не описывалась популярными моделями начала взрывной фазы суббури, но может быть важной для решения вопроса о совпадении или существенном отличии изолированных суббурь от суббурь во время магнитной бури.

Позже появились и подробные результаты измерений давления ионов вблизи экваториальной плоскости магнитосферы, которые позволили показать, что основная часть аврорального овала проецируется не на плазменный слой, а на окружающее Землю плазменное кольцо, в котором течет высокоширотная часть кольцевого тока (см. обзор [Antonova et al., 2018]). Полученные результаты позволяют проводить сравнения распределения давления на высотах ионосферы и в экваториальной плоскости магнитосферы при анализе суббурь.

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, несмотря на определенные трудности при отборе пролетов для такого анализа, 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, названной в работе [Newell et al., 1996] границей $b2i$, на которой наблюдается максимум потока высыпавшихся ионов с энергией >3 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 граница изотропизации характеризует вытянутость магнитных силовых линий ночной магнитосферы в антисолнечном направлении. Такую вытянутость обычно связывают с ростом поперечных токов хвоста магнитосферы во время предварительной фазы суббурь, но она может быть обусловлена также и ростом частичного кольцевого тока (см. аннотацию работы [Newell et al., 1998]).

В литературе (см., например, [Vorobjev et al., 2003]) часто используется термин “граница

изотропизации” вместо границы $b2i$, что может приводить к определенному непониманию. Положение границы изотропных высыпаний за счет несохранения магнитного момента частицы может рассматриваться только в одночастичной модели движения частицы в ламинарном магнитном поле. Оно определяется энергией частицы и соотношением ларморовского радиуса частицы с масштабом неоднородности магнитного поля. Поэтому, несмотря на многочисленные работы по определению границ изотропных высыпаний частиц разных энергий, такие границы не могут быть эффективно использованы для определения локализации аврорального брейкапа. Граница $b2i$ определялась по потоку высыпавшихся ионов (все ионы считались протонами, что применимо, в основном, к магнитоспокойным условиям) с энергиями >3 кэВ, что близко к ионному давлению, если средняя энергия иона велика по сравнению с выбранным порогом. Результаты работы Vorobjev et al. [2003] показали эффективность использования $b2i$ при анализе динамики суббурь. Поэтому в работе мы рассматриваем положение границы $b2i$ в качестве эффективного метода изучения динамики авроральных высыпаний.

Авроральные высыпания, регистрируемые спутниками DMSP на широтах выше $b2i$, характеризуются как изотропные. В условиях магнитостатического равновесия в изотропной плазме ее характеристики (давление, температура и плотность) остаются постоянными вдоль силовой линии геомагнитного поля [Goertz and Baumjohann, 1991] в тех областях, где температура ионов намного превышает продольную разность потенциалов. Таким образом, с одной стороны, как и поступают обычно, 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 суббурь и определе-

ние методом “морфологического проецирования” области локализации аврорального брейка-па в экваториальной плоскости магнитосферы.

2. ДАННЫЕ И МЕТОДИКА

Для анализа характеристик авроральных высыпаний использовались данные спутника DMSP F7 в 3-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 высыпавшихся частиц в диапазоне энергий от 32 эВ до 30 кэВ в 19 каналах, распределенных по энергиям в логарифмической последовательности. Исправленные геомагнитные координаты (CGL, MLT) траектории спутника на высоте 110 км рассчитывались по модели AACGM [Baker and Wing, 1989]. Данные спутника взяты на страницах (<http://sd-www.jhuapl.edu>).

В качестве первичного материала в работе использована база данных спутника DMSP F7 за 1986 г., созданная и представленная ранее в работе [Vorobjev et al., 2003]. Кроме характеристик высыпавшихся 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. В базе данных выделены четыре фазы суббуревой активности: (1) магнитоспокойный период, (2) фаза зарождения, (3) фаза развития и (4) фаза восстановления. Каждая из фаз 2, 3 и 4 дополнительно разбита на три равные по временному интервалу подфазы, соответствующие начальной, средней и заключительной стадии каждой из фаз.

База данных спутников DMSP содержит более 32000 пересечений спутниками авроральной зоны. Фазы магнитного возмущения для этой базы данных определялись визуальным анализом суточных вариаций AL -индекса. Такая методика вполне приемлема для статистической обработки больших массивов данных. Однако для настоящего исследования необходим более детальный анализ уровня магнитной возмущенности. С этой целью 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-минутных значений AL -, SYM/H - и PC -индексов магнитной активности. Вариации B_z -компоненты ММП и динамического давления солнечного ветра P_{sw} 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 высыпавшихся ионов использованы значения ионного давления (P_i), а для высыпавшихся электронов $I_{557.7}$ — интенсивность свечения в эмиссии (OI) 557.7 нм. Методика определения ионного давления по измерениям спутников DMSP впервые была опубликована в статье [Wing and Newell, 1998]. В настоящей работе использован модифицированный вариант этой методики, предложенный в работе [Stepanova et al., 2006], который позволяет получить значение давления выше области продольного ускорения электронов и проводить сравнение с давлением вблизи экваториальной плоскости. Давление ионов рассчитывается в предположении максвелловского распределения частиц по энергиям. Несмотря на то, что в авроральной зоне часто регистрируются немаксвелловские энергичные хвосты функций распределения [Wing and Newell, 1998], это не приводит к значительным ошибкам при вычислении давления в рассматриваемых областях, так как показатель к ионной функции при аппроксимации каппа-распределением ~10 [Kirpichev et al., 2021].

Алгоритм расчета интегральной интенсивности свечения эмиссии (OI) 557.7 нм представлен в работе [Воробьев и др., 2013]. При расчете интенсивности свечения принимались во внимание процессы образования электронно-возбужденного атома $O(^1S)$ в результате переноса энергии возбуждения из метастабильного состояния $N_2(A^3\Sigma_u^+)$, возбуждение $O(^3P)$ первичными и вторичными электронами и диссоциативная рекомбинация. В качестве входных параметров модели использовались средняя энергия и интегральный поток энергии высыпавшихся электронов, что иногда могло приводить к недооценке уровня свечения в областях узких электронных пучков, время пересечения которых спутником меньше временного разрешения спектрометра, т.е. толщина которых менее ~7–8 км. Такие пучки формируются в результате ускорения электронов ионосферного происхождения вдоль магнитных силовых линий (см. обсуждение в работе [Vorobjev et al., 2024]).

В работе [Roach and Jamnick, 1958] было установлено, что самое слабое свечение, которое в ночном небе способен различить человеческий глаз, должно быть в 3–4 раза интенсивнее, чем нормальное свечение ночного неба. Яркость аврорального свечения определяется в килоРэлях (кР). Если принять уровень свечения чистого

ночного неба в эмиссии 557.7 нм примерно 0.15–0.20 кР, то человеческий глаз, адаптированный к уровню свечения ночного неба, способен различить полярное сияние интенсивностью в зеленой линии более ~0.6–0.8 кР. По международной классификации в зависимости от яркости свечения эмиссии 557.7 нм сияния делятся на 4 класса. Первый класс — это слабые сияния до 1 кР, яркость которых сравнима с яркостью Млечного пути. Второй класс — средние по интенсивности сияния до 10 кР, по яркости сравнимые с яркостью перистых облаков, освещенных Луной. Третий класс — яркие сияния до 100 кР, по яркости сравнимые с яркостью кучевых облаков, освещенных Луной. Четвертый класс — очень яркие сияния с интенсивностью свечения до 1000 кР. Такие сияния создают на земной поверхности освещенность, сравнимую с освещенностью от полной Луны.

В разделе 5 настоящей работы проводится сопоставление широтных профилей ионного давления, полученных по наблюдениям спутника F7, с радиальным распределением P_i в экваториальной плоскости магнитосферы по данным спутников миссии THEMIS, опубликованным на сайте (<https://themis.ssl.berkeley.edu/data/themis/>). Измерения спутником DMSP F7 проводились в 1986 г. — это год спокойного Солнца в минимуме 21-го цикла солнечной активности. Данные спутников THEMIS использовались за 2008–2010 гг. в минимуме 23-го цикла солнечной активности, так что здесь не должно быть большой разницы в положении границы $b2i$ в зависимости от фазы солнечного цикла.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК 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 B_z -компоненты ММП ($DP-2$ вариации).

Типичный пример одного из таких событий представлен на рис. 1, где показаны параметры межпланетной среды и индексы магнитной активности в интервале 01:00–05:00 UT 08 октября

1986 г. Время пролета спутника указано вертикальной штриховой линией. Пролет спутника наблюдался в период очень низкой магнитной активности при северной ориентации ММП. Значения PC -индекса были близкими к нулю, а величина AL -индекса даже в пиковых значениях была не ниже -20 нТл.

Широтные распределения характеристик ионных (a) и электронных (b) высыпаний по наблюдениям спутника F7 в этом пролете представлены на рис. 2. Сверху вниз на рис. 2а показаны средние энергии (E_i , кэВ) и потоки энергий (F_i , эрг/см² с) ионных высыпаний, а на рис. 2б — средние энергии (E_e , кэВ) и потоки энергий (F_e , эрг/см² с) электронных высыпаний. Точки на графиках соответствуют значениям параметров, измеренных спутником. По горизонтальной оси на рисунке отложена исправленная геомагнитная широта (CGL). В этом пролете спутника положение максимума F_i , соответствующее положению границы $b2i$, было зарегистрировано на широте 67.8° CGL в 03:09 UT (время округлено до минут). На рис. 2 положение $b2i$ отмечено вертикальной штриховой линией.

Для этого пролета спутника широтный ход ионного давления (P_i) представлен на рис. 3а. Ионное давление определяется потоком энергии высыпавшихся ионов и их средней энергией. Средняя энергия высыпавшихся ионов в области авроральных высыпаний меняется незначительно, поэтому широтный ход ионного давления подобен широтному ходу F_i , а максимум P_i примерно совпадает с положением границы $b2i$. На рис. 3а широта максимума ионного давления величиной ~0.4 нПа совпадает с положением $b2i$ и обозначена вертикальной штриховой линией. При вычислении давления, также как при вычислении средних энергий и потоков энергии ионов, не учитывалось существование продольного падения потенциала. Область низкого (~0.2 нПа) давления к полюсу от максимума, по-видимому, соответствует структуре типа перевернутого V с характерной энергией ~3 кэВ, блокирующей высыпания ионов с энергиями, не превышающими эту величину. В области сравнительно больших значений давления продольная разность потенциалов невелика, что можно видеть при сравнении рисунков 2 и 3, и, значит, вычисленные значения давления близки к давлению в экваториальной плоскости.

Экваториальное $b2i$ давление ионов быстро падает вследствие уменьшения продольной составляющей P_i и быстрого роста его поперечной компоненты. К полюсу от $b2i$, в целом, наблюдается более плавное уменьшение ионного давления.

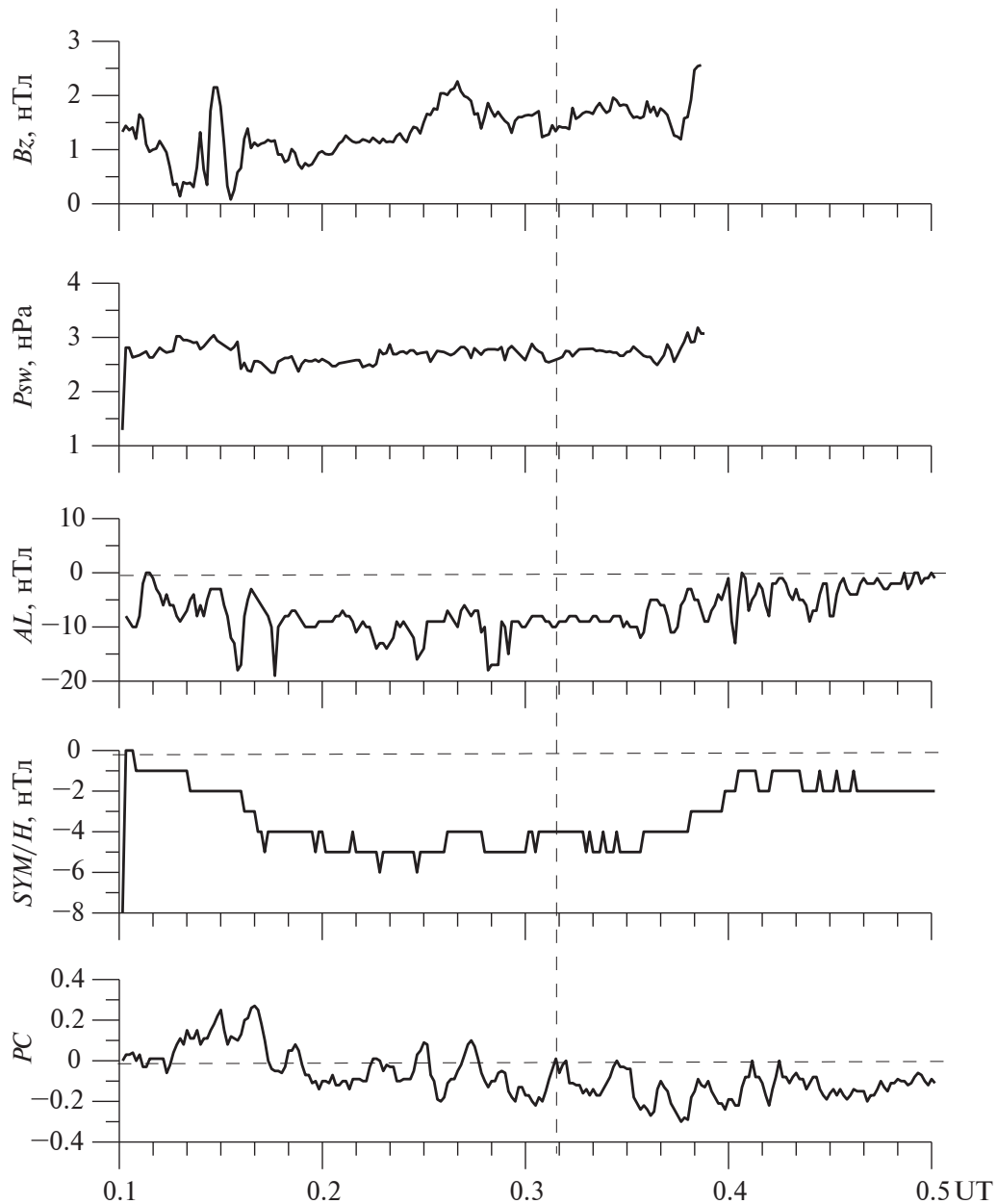


Рис. 1. Вариации параметров межпланетной среды и уровней геомагнитной активности 08 октября 1986 г. в интервале 01:00–05:00 UT. Сверху вниз показаны: вариации B_z -компоненты ММП и динамического давления солнечного ветра, вариации AL -, SYM/H - и PC -индексов магнитной активности. Данные по ММП и солнечному ветру приведены в пересчете на лобовую точку фронта ударной волны. Время пролета спутника F7 указано вертикальной штриховой линией.

Интенсивность свечения эмиссии 557.7 нм для этого пролета спутника показана на рис. 3б. Величина $I_{557.7}$ определяется, главным образом, E_e и F_e . Значение средней энергии выпадающих электронов в диапазоне энергий 1–10 кэВ слабо влияет на уровень свечения эмиссии 557.7 нм, поэтому, как и в случае ионной популяции, широтный ход эмиссии примерно соответствует ши-

ротному распределению потока энергии выпадающих электронов. Согласно рис. 2б и 3б, электронные выпадения даже в такой “экстремально” спокойный период регистрируются от границы $b2i$ на широте 67.8° CGL примерно до 71° CGL. Свечение в этот период можно отнести к субвизуальным или очень слабым полярным сияниям, исключая резкое локальное увеличение потока

энергии высыпавшихся электронов на широтах 70.8° – 71.0° CGL, которое, наиболее вероятно, связано с дугой полярного сияния интенсивностью около 4 кР.

Среднее широтное распределение ионного давления в спокойные периоды показано на рис. 4а. Кривая получена методом наложения эпох относительно $b2i$, средняя широта которой в спокойные

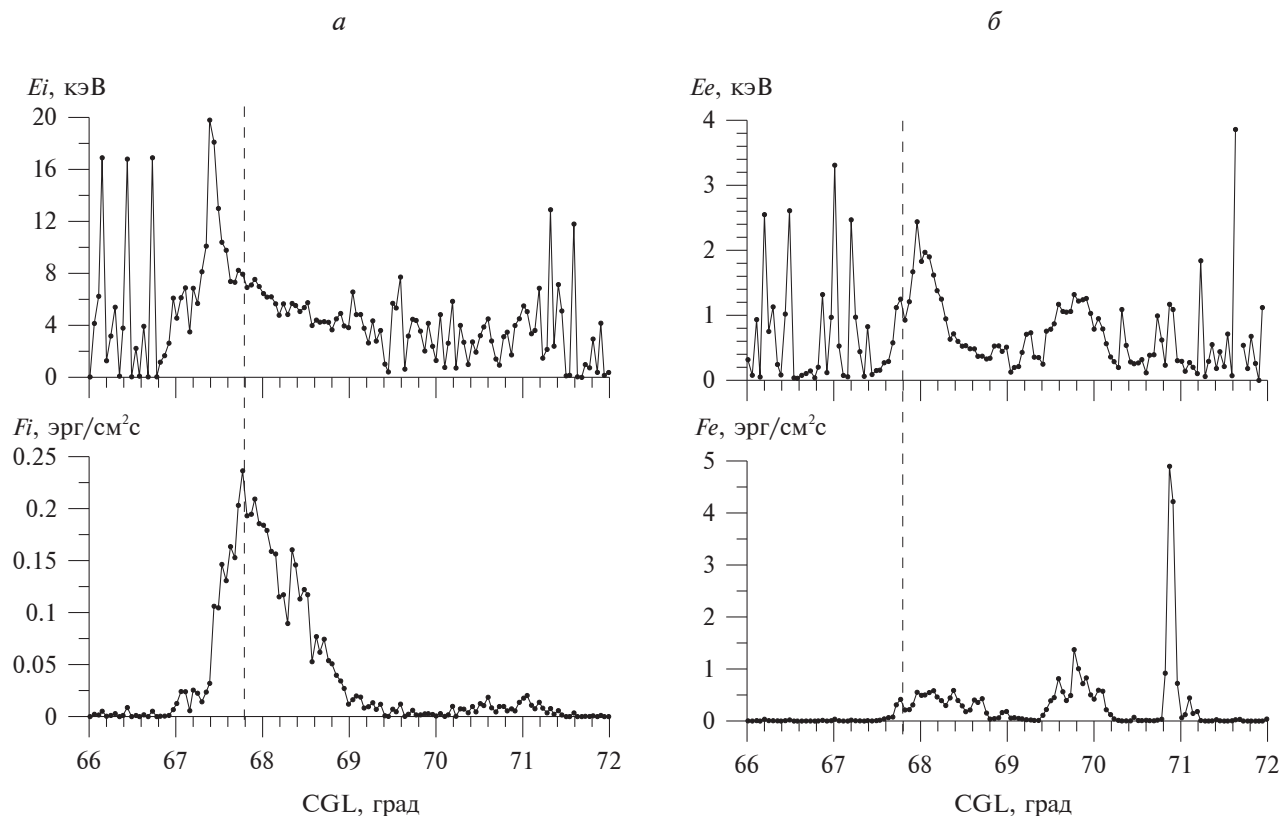


Рис. 2. Интегральные характеристики высыпавшихся частиц по наблюдениям спутника F7 08 октября 1986 г. в 03:09–03:10 UT: (а) – средние энергии (E_i , кэВ) и потоки энергии (F_i , эрг/см² с) высыпавшихся ионов, (б) – средние энергии (E_e , кэВ) и потоки энергии (F_e , эрг/см² с) высыпавшихся электронов. По горизонтальной оси отложена исправленная геомагнитная широта (CGL). Вертикальные штриховые линии – положение границы $b2i$.

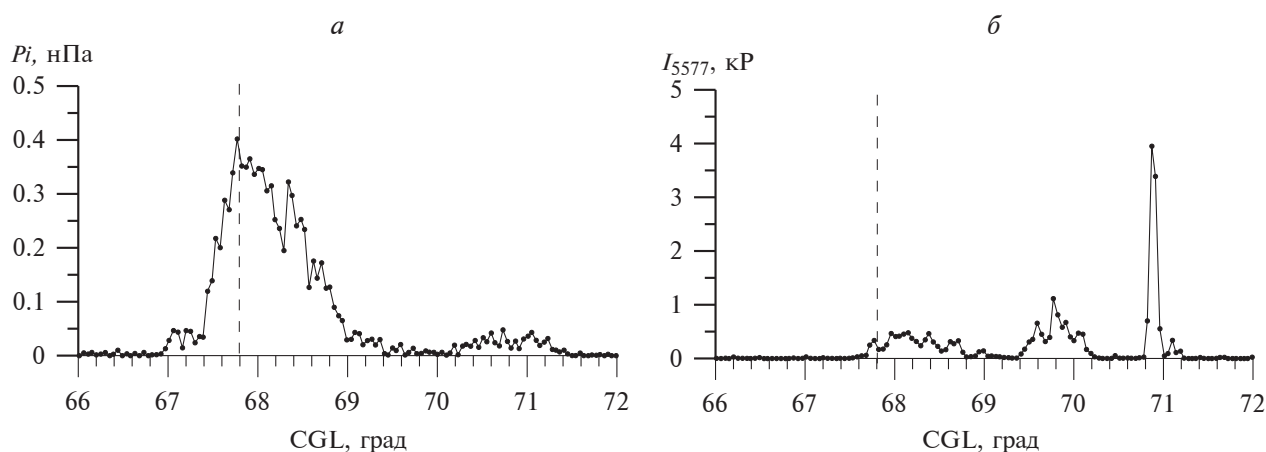


Рис. 3. Широтные профили ионного давления (а) и интенсивности свечения эмиссии 557.7 нм (б), рассчитанные по данным рис. 2а и 2б соответственно. Вертикальные штриховые линии – положение границы $b2i$.

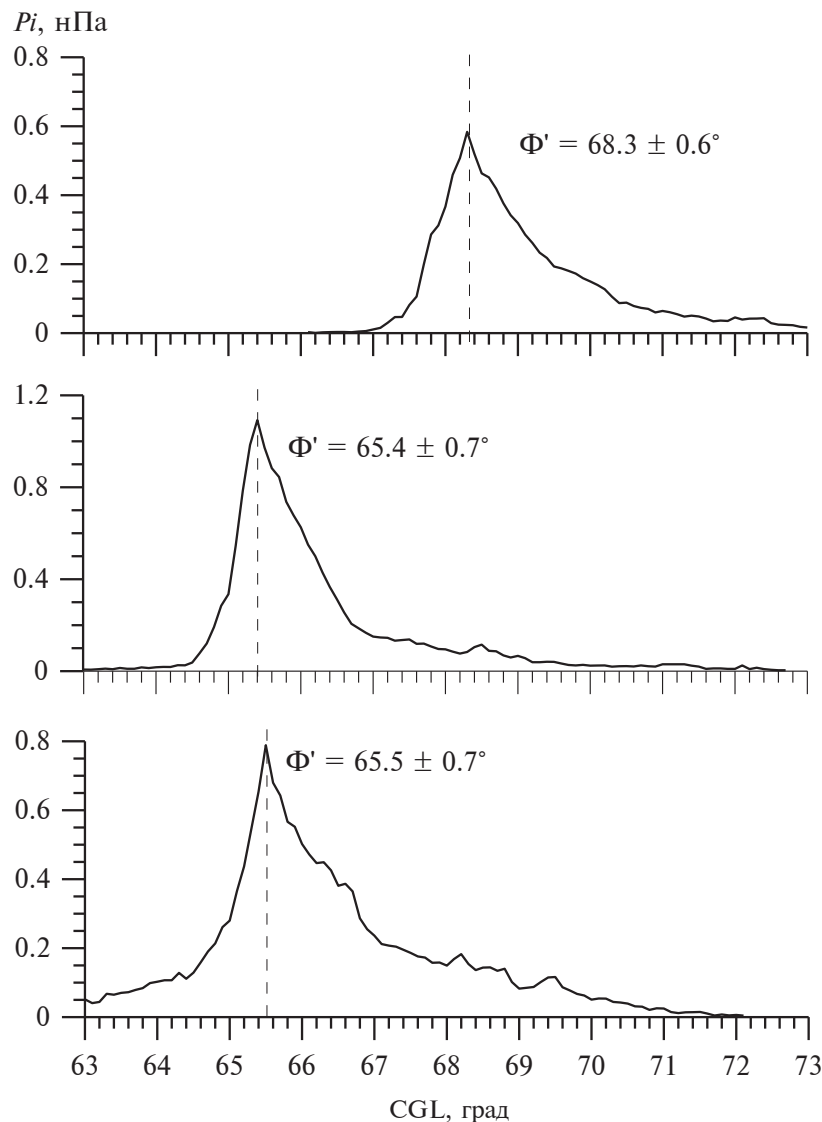


Рис. 4. Средние широтные профили ионного давления, P_i (нПа): (а) — магнитоспокойный период, (б) — заключительная стадия фазы зарождения суббури, (в) — начальная стадия фазы развития суббури. Вертикальные штриховые линии — среднее положение $b2i$.

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, $\langle IMF B_z \rangle = +2.3$ нТл и $\langle P_{sw} \rangle = 2.5$ нПа. Широтное распределение ионного давления на рис. 4а получено усреднением данных по 20 пролетам спутника через зону высыпаний. Увеличение числа пролетов спутника для получения средних характеристик не приводит к существенному изменению профиля ионного давления. Однако в области дискретных электронных высыпаний

приводит 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 мин до начала фазы развития суббури (T_0) показано на рис. 4б. Для исследования отбирались пролеты спутника при хоро-

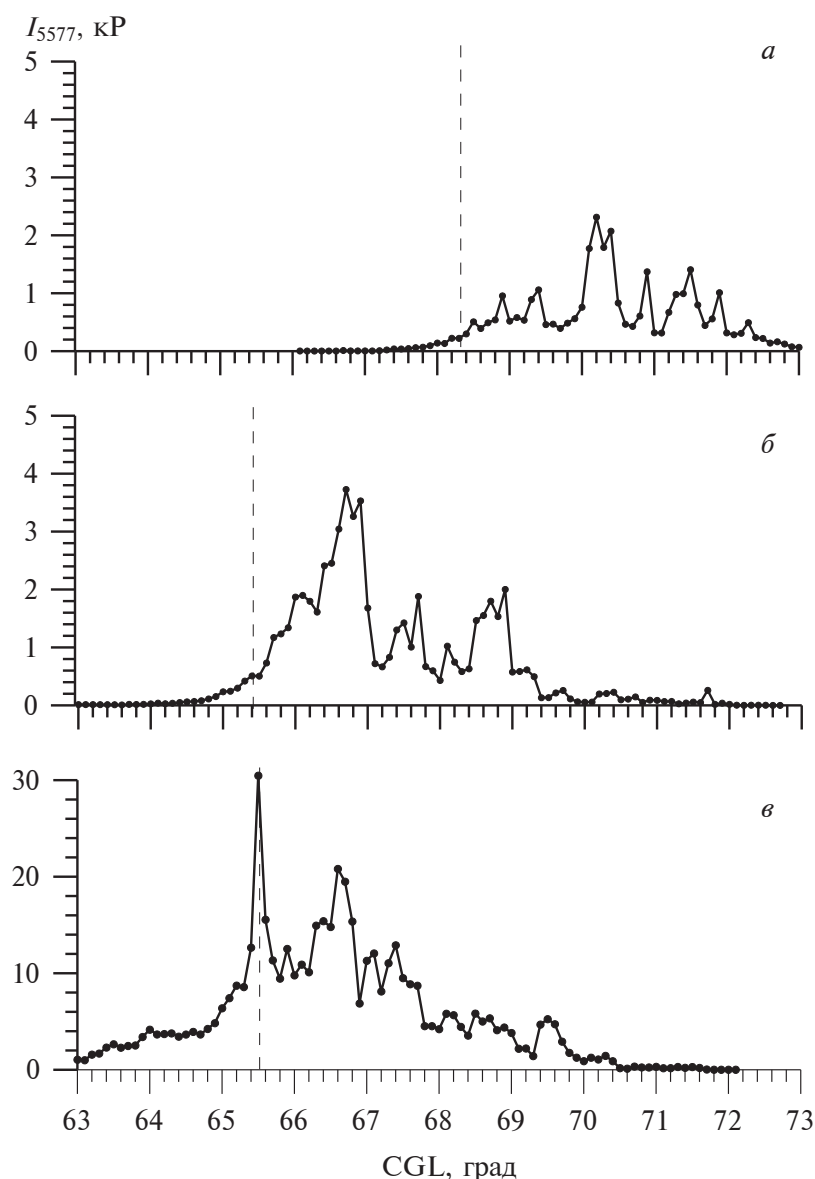


Рис. 5. Средние широтные профили интенсивности свечения эмиссии 557.7 нм, $I_{557.7}$ (кР). Панели (а–в) соответствуют панелям (а–в) на рис. 4. Вертикальные штриховые линии – среднее положение $b2i$.

шо выраженной в индексах AL и PC фазой зарождения суббури и достаточно четко выраженным в AL -индексе моментом T_0 . Широтное распределение ионного давления на рис. 4б 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, $\langle B_z \rangle_{ММП} = -1.4$ нТл, $\langle P_{sw} \rangle = 3.3$ нПа. Рисунок 4б показывает, что по отношению к магнитно-спокойным условиям в период фазы зарождения суббури граница $b2i$ сместилась к экватору и перед самым началом фазы развития, 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 (рис. 4а) до $\langle Pi \rangle = (1.1 \pm 0.1)$ нПа в заключительную стадию фазы зарождения.

Среднее распределение ионного давления в начальный период фазы развития суббури иллюстрирует рис. 4в. 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 $\Phi^i = 65.4^\circ \pm 0.7^\circ$ 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. 5 *a–в*. На панелях *a–в* рис. 5 изображены средние широтные профили свечения эмиссии 557.7 нм, полученные по наблюдениям средних энергий и потоков энергии высыпавшихся электронов в соответствующих рис. 4 *a–в* пролетах спутника F7. В целом, рис. 5 *a–в* показывает, что основные электронные высыпания регистрируются в области изотропных высыпаний к полюсу от $b2i$. К экватору от $b2i$ до начала фазы развития суббури (рис. 5*a* и 5*б*) существует очень узкая $\sim 0.5^\circ$ широты область слабого субвизуального диффузного свечения. После начала фазы развития суббури яркость свечения экваториальнее $b2i$ увеличивается до 4–8 кР, а ширина области свечения до $\sim 2^\circ$ широты.

В спокойные периоды (рис. 5*a*) слабое субвизуальное свечение наблюдается и к полюсу от $b2i$ до $\sim 70^\circ$ CGL. Заметное увеличение интенсивности свечения наблюдается на широтах 70° – 72° CGL. В этом диапазоне широт фактически в каждом пролете спутника регистрируются от 1 до 3 резких локальных увеличений интенсивности свечения, часто до нескольких десятков кР, которые, по всей вероятности, связаны с дугами сияний спокойного аврорального овала. Пример такого локального увеличения интенсивности свечения в пролете спутника 08 октября 1986 г. показан на рис. 3*б*. Усреднение данных по всем событиям дает в этой области дискретных высыпаний сглаженную картину, которая представлена на рис. 5*a*. Увеличение числа пролетов спутника для получения средних характеристик приведет в этой области только к еще более сильному сглаживанию высыпаний и к уменьшению средних значений яркости свечения.

В заключительную стадию фазы зарождения суббури (рис. 5*б*) средние значения интенсивности свечения увеличиваются по сравнению со спокойным периодом (рис. 5*a*) примерно в 2 раза, а область максимального свечения приближается к $b2i$.

После начала фазы развития суббури (рис. 5*в*) регистрируется узкий, четко выраженный пик электронных высыпаний на границе $b2i$, ассоци-

ируемый с яркой дугой сияния со средней яркостью в зеленой линии $I_{557.7} \sim 30$ кРл. Положение максимально яркой дуги сияния сразу же после начала фазы развития суббури в максимуме ионного давления, по-видимому, свидетельствует о том, что авроральный брейкап начинается в области максимального ионного давления.

Отсутствие измерений питч-углового распределения не позволяет точно идентифицировать природу авроральных высыпаний в пике высыпаний, приводящих к полярному сиянию третьего класса яркости. Можно только предположить, что возникает узконаправленный пучок электронов ионосферного происхождения типа, описанного в работе [Mende et al., 2003]. В рамках теории суббури, развитой в работах [Antonova et al., 2002; Stepanova et al., 2002], такой пучок образуется в результате проникновения холодных электронов ионосферного происхождения в область продольного падения потенциала. Такое проникновение возникает в результате резкого нарастания компоненты течения плазмы поперек предбрейкаповой дуги перед моментом T_0 .

5. ПРОЕКЦИИ ГРАНИЦЫ ИЗОТРОПИЗАЦИИ В ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ МАГНИТОСФЕРЫ

Как было упомянуто выше, в изотропной плазме в условиях магнитостатического равновесия давление плазмы остается постоянным 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 ионного давления, а ее 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. Первые результаты в данном направлении были получены в работе [Кирпичев и Антонова, 2011]. В дальнейшем, такие результаты опубликованы в ряде работ по всей базе данных THEMIS. Радиальное распределение давления в экваториальной плоскости ($Z_{SM} = 0 \pm 1$ Re) в секторе 21:00–24:00 MLT показано на рис. 6. Профиль ионного давления на рис. 6*a* получен для магнитоспокой-

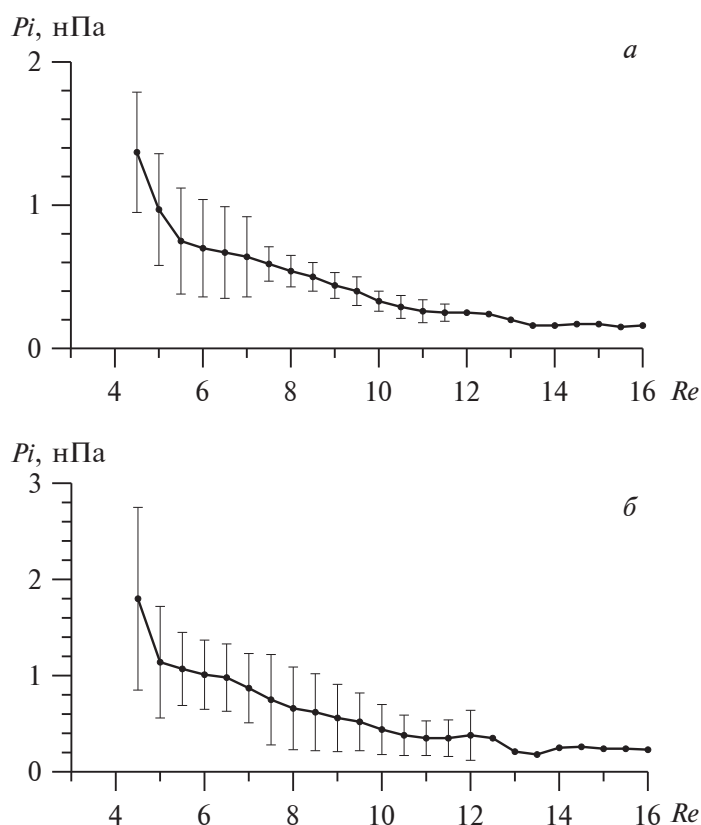


Рис. 6. Радиальное распределение ионного давления в предполуночном секторе магнитосферы Земли в магнитоспокойные периоды при положительной (а) и отрицательной (б) полярности вертикальной компоненты ММП.

ных условий ($AL > -200$ нТл, $Dst > -20$ нТл, $P_{sw} = 2.5 \pm 1.0$ нПа, B_z ММП = 2.0 ± 1.0 нТл), которые примерно соответствуют условиям, при которых был получен широтный профиль ионного давления в ионосфере, показанный на рис. 4а.

На рис. 6б показан профиль ионного давления при спокойных условиях, но при отрицательных значениях B_z -компоненты ММП ($AL > -200$ нТл, $Dst > -20$ нТл, $P_{sw} = 3.5 \pm 1.0$ нПа, B_z ММП = -1.0 ± 1.0 нТл). Такие параметры наиболее близки к фазе зарождения суббури и к условиям, соответствующим распределению ионного давления на рис. 4б.

Данные, иллюстрируемые на рис. 4а, 4б и рис. 6а, 6б, позволяют провести сопоставление широтного профиля ионного давления, полученного на высотах ионосферы, с радиальным распределением ионного давления в магнитосфере Земли. При условии равенства давлений вдоль геомагнитных силовых линия это делает возможным определить положение $b2i$ и всего профиля ионного давления в экваториальной плоскости магнитосферы. Процедура сопоставления давле-

ний можно кратко описать следующим образом. Положение пика давления в ионосфере совмещается с точкой в магнитосфере, имеющей равное значение давления, и здесь фиксируется. Далее производится линейное масштабирование кривой ионосферного профиля давления до достижения ее наилучшего согласия с кривой профиля давления в магнитосфере.

Результаты такого морфологического проецирования (тонкая сплошная кривая) и сопоставления с радиальным профилем давления по данным THEMIS (кривая с точками) представлены на рис. 7. Верхняя горизонтальная шкала на рис. 7 показывает исправленные геомагнитные широты, а нижняя — радиальное расстояние, на которое эти широты проектируются в экваториальную плоскость магнитосферы. Так как разброс данных в экваториальной плоскости на больших R_e очень значительный, верхняя и нижняя шкалы в данном представлении не интерпретируются как соответствующие друг другу по всей длине. Важным в этом подходе является (1) схожесть поведения ионного давления с увеличением широты в ионосфере и расстояния в экваториальной плоскости

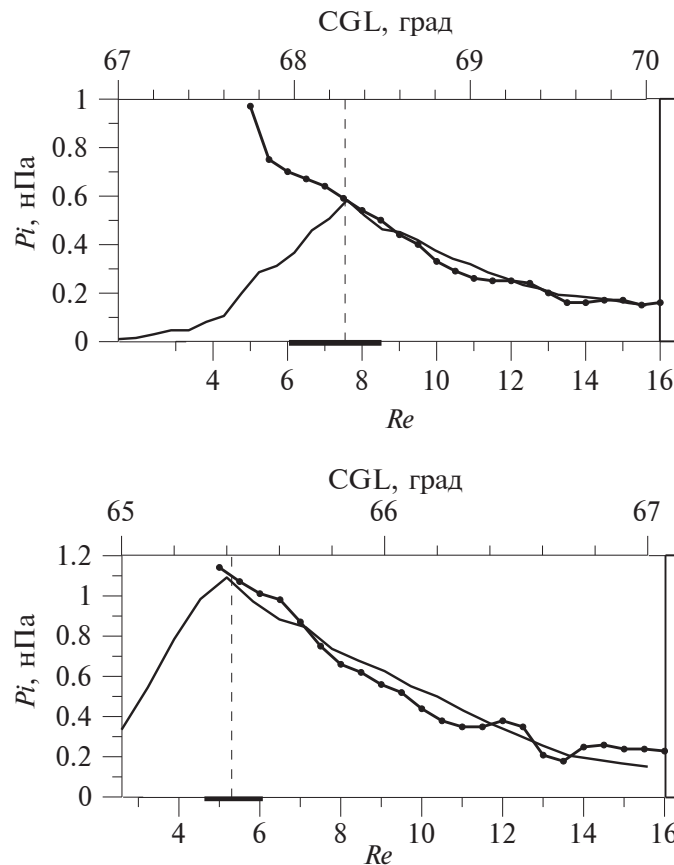


Рис. 7. Проецирование широтного профиля ионного давления в ионосфере в экваториальную плоскость магнитосферы (тонкая кривая) и его сравнение с наблюдениями в экваториальной плоскости (кривая с точками). Верхняя панель — магнитоспокойный период; нижняя панель — заключительная стадия фазы зарождения суббури.

при определении только в двух крайних точках: положение максимума на ионосферных высотах и положение минимального давления на расстояниях $\sim 13\text{--}14 Re$ и (2) определение положения проекции границы $b2i$ в экваториальной плоскости.

Штриховыми линиями на рис. 7 отмечено положение границы $b2i$. Рисунок 7 (верхняя панель) показывает, что в спокойных условиях при низком уровне магнитной активности и положительных значениях вертикальной компоненты ММП $b2i$ проектируется в экваториальную плоскость на расстояния $\sim 7.5 Re$. Рисунок 7 (нижняя панель) показывает сравнение профилей давления в экваториальной плоскости и на высотах ионосферы в заключительную стадию фазы зарождения суббури. Из этого рисунка следует, что по сравнению со спокойным периодом в фазу зарождения суббури, $b2i$ смещается к экватору и регистрируется на расстоянии $\sim 5.2 Re$ перед началом фазы развития суббури. Отрезком жирной штриховой линии на нижней горизонтальной шкале рис. 7а, в и рис. 7б показан интервал расстояний, соответ-

ствующий среднеквадратичной ошибке вычисления среднего ионного давления.

В период фазы развития суббури из-за наличия различных механизмов усиления и ослабления потоков высыпавшихся частиц и высокого уровня турбулентных флуктуаций метод морфологического проектирования уже не может быть использован. Основываясь на том, что широтное положение $b2i$ в заключительную стадию фазы зарождения суббури и в начале фазы развития остается неизменным, и, принимая во внимание появление области сильных локальных электронных высыпаний вблизи $b2i$, можно сделать вывод, что авроральный брейкап в предполночном секторе магнитосферы в среднем регистрируется на расстояниях $\sim 5\text{--}6 Re$ от Земли.

6. ОБСУЖДЕНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Наблюдения спутника F7 в секторе 21:00–24:00 MLT использованы для определения средних характеристик высыпавшихся электро-

нов и ионов. Получены средние широтные профили ионного давления и аврорального свечения на высотах ионосферы в спокойные периоды и в периоды начала магнитосферных суббурь. Для определения среднего радиального распределения ионного давления в экваториальной плоскости магнитосферы были использованы наблюдения спутников миссии THEMIS. Сравнение широтного распределения давления плазмы на высотах ионосферы с давлением плазмы в экваториальной плоскости позволило существенно уточнить локализацию области начала взрывной фазы классической суббури в магнитосфере Земли без использования какой-либо модели геомагнитного поля.

Основные результаты исследования можно сформулировать следующим образом.

1. Получены средние широтные профили ионного давления в предполуночном секторе, рассчитанные по измерениям спутника F7, в магнитоспокойных условиях, в заключительный период фазы зарождения и в начальный период фазы развития суббури.

2. Показано, что максимум в широтном профиле давления близко совпадает с положением границы ионных высыпаний $b2i$ по классификации [Newell et al., 1998]. Широта граница $b2i$ в спокойные периоды составляет $\Phi' = 68.3^\circ \pm 0.6^\circ$ CGL, в то время как перед началом суббури и в начальный период фазы ее развития граница $b2i$ располагается на широтах $\Phi' = 65.4^\circ \pm 0.7^\circ$ CGL.

3. По наблюдениям спутников THEMIS получены средние радиальные профили давления плазмы в предполуночном секторе в магнитоспокойных условиях ($AL > -200$ нТл, B_z ММП > 0) и в периоды, по параметрам межпланетной среды и уровню геомагнитной активности наиболее близко соответствующие фазе зарождения суббури ($AL > -200$ нТл, но B_z ММП < 0).

4. Сопоставление ионного давления в ионосфере и давления 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.

5. Проведены оценки яркости аврорального свечения в эмиссии 557.7 нм, рассчитанные по наблюдениям средней энергии и потока энергии высыпавшихся электронов спутником F7. Показано, что в спокойные периоды и перед началом суббури сияния регистрируются в области изотропных высыпаний к полюсу от границы $b2i$.

6. В начальный период фазы развития суббури статистически показано существование локального, узкого, четко выраженного пика электронных высыпаний на границе $b2i$, ассоциируемого с яркой дугой сияния 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 в работе результаты дают основание предположить, что область аврорального брейкапа проецируется в магнитосферу Земли на геоцентрические расстояния ~ 5 –6 Re.

Движение экваториальной границы аврорального овала в более низкие широты с началом фазы зарождения суббури было открыто в 70-х годах прошлого столетия. Смещение границы $b2i$ к экватору во время вытягивания магнитных силовых линий в хвост магнитосферы отмечалось еще в работе (Newell et al., 1998) и рассматривалось как результат динамики тока хвоста магнитосферы. Однако сравнения статистически полученных значений давления на малых высотах и вблизи экваториальной плоскости с учетом положения границы $b2i$ до настоящего времени не проводились. В результате исследований, выполненных в настоящей работе, удалось определить величину сдвига $b2i$ при переходе от магнитоспокойных условий (~ 7.5 Re) к началу фазы развития суббури (5–6 Re). Существование такого сдвига указывает на локализацию начала взрывной фазы суббури глубоко внутри кольцевого тока и может свидетельствовать в поддержку утверждения об отсутствии качественных различий механизмов развития изолированных суббурь от суббурь во время магнитной бури. Однако проверка последнего утверждения требует дополнительных исследований.

Необходимо также обсудить подход работы Newell et al. [1998], в которой вытягивание магнитных силовых линий связывается с развитием токов хвоста магнитосферы. Результаты анализа данных миссии THEMIS позволили выделить окружающую Землю область плазмы с характеристиками, соответствующими “ближней к Земле области плазменного слоя” и выделить окружающее Землю плазменное кольцо [Antonova et al., 2013, 2014]. Было показано, что усредненный радиальный градиент плазменного давления в кольце направлен к Земле, что свидетельствует о наличии внешней области кольцевого тока. Такой ток сосредоточен вблизи экватора только в вечерние, ночные и утренние часы, а в дневные часы в результате

сжатия магнитосферы солнечным ветром и сдвигом минимумов магнитного поля в высокие широты, размазан вдоль магнитной силовой линии (см. обзор [Antonova et al., 2018]). Внешняя граница области такого тока локализована на геоцентрических расстояниях $\sim 10\text{--}13 R_E$, что значительно превышает геоцентрическое расстояние локализации проекции $b2i$ на экваториальную плоскость. При развитии кольцевого тока в области, где давление плазмы становится сопоставимым с давлением магнитного поля, происходит вытягивание магнитных силовых линий в радиальном направлении и формируется магнитный диск. Такая структура появилась при моделировании магнитосферы Земли, начиная с модели Ц-89 [Tsyanenko, 1989]. Вытягивание магнитных силовых линий, наблюдаемое во время предварительной фазы суббури на геостационарной орбите, скорее всего, в основном, связано с развитием кольцевого тока, включая его внешнюю часть. Наблюдаемые диполизации внутри кольцевого тока можно связывать с развитием неустойчивости распределения плазмы и крупномасштабных продольных токов, что позволяет не рассматривать процессы в турбулентном магнитосферном хвосте в качестве обязательного механизма суббуревых возмущений.

Наблюдаемое в момент начала взрывной фазы суббури уярчение ближайшей к экватору дуги третьего, а, в ряде случаев, и четвертого класса яркости, хорошо укладывается в описанную выше схему суббуревых процессов. Такое уярчение соответствует формированию пучка холодных в поперечном направлении ионосферных электронов, проникающих в область продольного падения потенциала. Плотность холодных электронов ионосферного происхождения на высотах области продольного ускорения ($\sim 10\text{--}10^2 \text{ см}^{-3}$) на один-два порядка превышает плотность электронов магнитосферы, что приводит к появлению свечений третьего и четвертого класса яркости. Описанный выше сценарий существенно отличается от общепринятых. Поэтому еще много предстоит сделать для проверки описанной выше картины развития суббуревых процессов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят команды проектов DMSP и THEMIS за возможность использования данных, опубликованных на сайтах (<https://themis.ssl.berkeley.edu/data/themis/>) и (<https://dmisp/bc/edu/>). Параметры ММП, плазмы солнечного ветра и индексы магнитной активности взяты на страницах (<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>) и (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>).

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследования, выполненные Воробьевым В.Г., поддержаны Российским научным фондом РНФ, проект 22-12-20017.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Воробьев В.Г., Кириллов А.С., Катькалов 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>
- Деспирак И.В., Клейменова Н.Г., Любич А.А., Малышева Л.М., Громова Л.И., Ролдугин А.В., Козелов Б.В. Магнитные суббури и сияния в полярных широтах Шпицбергена: Событие 17 декабря 2012 г. Изв. РАН. Сер. Физическая. Т. 86. № 3. С. 340–348. 2022. <https://doi.org/10.31857/S0367676522030097>
- Кирпичев И.П., Антонова Е.Е. Распределение давления плазмы в экваториальной плоскости магнитосферы Земли на геоцентрических расстояниях от 6 до $10 R_E$ по данным международного проекта THEMIS // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 51. № 4. С. 456–461. 2011.
- Клейменова Н.Г., Антонова Е.Е., Козырева О.В., Малышева Л.М., Корнилова Т.А., Корнилов И.А. Волновая структура магнитных суббурь в полярных широтах // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 52. № 6. С. 785–793. 2012.
- Akasofu S.-I. The development of the auroral substorm // Planet. Space Sci. V. 12. № 4. P. 273–282. 1964. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(64\)90151-5](https://doi.org/10.1016/0032-0633(64)90151-5)
- Antonova E.E. The results of INTERBALL/Tail observations, the inner magnetosphere substorm onset and particle acceleration // Adv. Space Res. V. 30. № 7. P. 1671–1676. 2002. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(02\)00434-9](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)00434-9)
- Antonova E.E., Kirpichev I.P., Vovchenko V.V., Stepanova M.V., Riazantseva M.O., Pulnits M.S., Ovchinnikov I.L., Znaatkova S.S. Characteristics of plasma ring, surrounding the Earth at geocentric distances $\sim 7\text{--}10 R_E$, and magnetospheric current systems // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. V. 99. P. 85–91. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2012.08.013>
- Antonova E.E., Kirpichev I.P., Stepanova M.V. Plasma pressure distribution in the surrounding the Earth plasma ring and its role in the magnetospheric dynamics // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. V. 115–116. P. 32–40. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2013.12.005>
- Antonova E.E., Stepanova M., Kirpichev I.P., Ovchinnikov I.L., et al. Structure of magnetospheric current systems and mapping of high latitude magnetospheric regions to the ionosphere // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. V. 177. P. 103–114. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.10.013>
- Baker K.B., Wing S. A new magnetic coordinate system for conjugate studies at high latitudes // J. Geophys. Res. – Space. V. 94. № 7. P. 9139–9144. 1989. <https://doi.org/10.1029/JA094iA07p09139>

- Baker D.N., Pulkkinen T.I., Angelopoulos V., Baumjohann W., McPherron R.L. Neutral line model of substorms: Past results and present view // *J. Geophys. Res. – Space*. V. 101. № 6. P. 12975–13010. 1996. <https://doi.org/10.1029/95JA03753>
- Dubyagin S.V., Sergeev V.A., Carlson C.W., Marple S.R., Pulkkinen T.I., Yahnin A.G. Evidence of near-Earth breakup location // *Geophys. Res. Lett.* V. 30. № 6. ID 1282. 2003. <https://doi.org/10.1029/2002GL016569>
- Goertz C.K., Baumjohann W. On the thermodynamics of the plasma sheet // *J. Geophys. Res. – Space*. V. 96. № 12. P. 20991–20998. 1991. <https://doi.org/10.1029/91JA02128>
- Kim H.-J., Kim K.-C., Noh S.-J., Lyons L., Lee D.-Y., Choe W. New perspective on phase space density analysis for outer radiation belt enhancements: The influence of MeV electron injections // *Geophys. Res. Lett.* V. 50. № 14. ID e2023GL104614. 2023. <https://doi.org/10.1029/2023GL104614>
- Kirpichev I.P., Antonova E.E., Stepanova M., Eyelade A.V., Espinoza C.M., Ovchinnikov I.L., Vorobjev V.G., Yagodkina O.I. Ion kappa distribution parameters in the magnetosphere of the Earth at geocentric distances smaller than 20 R_E during quiet geomagnetic conditions // *J. Geophys. Res. – Space*. V. 126. № 10. ID e2021JA029409. 2021. <https://doi.org/10.1029/2021JA029409>
- Lui A.T.Y. Current disruption in the Earth's magnetosphere: Observations and models // *J. Geophys. Res. – Space*. V. 101. № 6. P. 13067–13088. 1996. <https://doi.org/10.1029/96JA00079>
- Mende S.B., Carlson C.W., Frey H.U., Peticolas L.M., Østgaard N. FAST and IMAGE-FUV observations of a substorm onset // *J. Geophys. Res. – Space*. V. 108. № 9. ID 1344. 2003. <https://doi.org/10.1029/2002JA009787>
- Newell P.T., Feldstein Ya.I., Galperin Y.I., Meng S.-I. The morphology of nightside precipitation // *J. Geophys. Res. – Space*. V. 101. № 5. P. 10737–10748. 1996. <https://doi.org/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 (b_{2i}) and the ion isotropy boundary // *J. Geophys. Res. – Space*. V. 103. № 3. P. 4739–4745. 1998. <https://doi.org/10.1029/97JA03622>
- Nosé M., Keika K., Kletzing C.A., Spence H.E., Smith C.W., MacDowall R.J., Reeves G.D., Larsen B.A., Mitchell D.G. Van Allen Probes observations of magnetic field dipolarization and its associated O^+ flux variations in the inner magnetosphere at $L < 6.6$ // *J. Geophys. Res. – Space*. V. 121. № 8. P. 7572–7589. 2016. <https://doi.org/10.1002/2016JA022549>
- Nosé M., Matsuoka A., Kasahara S., et al. Magnetic field depolarization and its associated ion flux variations in the dawnside deep inner magnetosphere: Arase observations // *Geophys. Res. Lett.* V. 45. № 16. P. 7942–7950. 2018. <https://doi.org/10.1029/2018GL078825>
- Persson M.A.L., Opgenoorth H.J., Pulkkinen T.I., et al. Near-earth substorm onset: A coordinated study // *Geophys. Res. Lett.* V. 21. № 17. P. 1875–1878. 1994. <https://doi.org/10.1029/94GL01426>
- Paschmann G., Haaland S., Treumann R. Auroral plasma physics // *Space Sci. Rev.* V. 103. № 1–4. P. 1–485. 2002. <https://doi.org/10.1023/A:1023030716698>
- Roach F.E., Jamnick P.M. The sky and eye // *Sky and Telescope*. V. 17. P. 164–168. 1958.
- Stepanova M.V., Antonova E.E., Bosqued J.M., Kovrazhkin R.A., Aubel K.R. Asymmetry of auroral electron precipitations and its relationship to the substorm expansion phase onset // *J. Geophys. Res. – Space*. V. 107. № 7. ID 1134. 2002. <https://doi.org/10.1029/2001JA003503>
- 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. № 8. P. 1631–1636. 2006. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2006.05.013>
- Tsyganenko N.A. A magnetospheric magnetic field model with a warped tail current sheet // *Planet. Space Sci.* V. 37. № 1. P. 5–20. 1989. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(89\)90066-4](https://doi.org/10.1016/0032-0633(89)90066-4)
- Vorobjev V.G., Yagodkina O.I., Starkov G.V., Feldstein Ya.I. A substorm in midnight auroral precipitation // *Ann. Geophys.* V. 21. № 12. P. 2271–2280. 2003. <https://doi.org/10.5194/angeo-21-2271-2003>
- Vorobjev V.G., Antonova E.E., Yagodkina O.I. How the intensity of isolated substorms is controlled by the solar wind parameters // *Earth Planets Space*. V. 70. № 1. ID 148. 2018. <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0922-5>
- Vorobjev V.G., Yagodkina O.I., Antonova E.E. Ionospheric features of polar cusp dayside precipitation under a northern IMF // *Geomagn. Aeronomy*. V. 64. № 3. P. 302–312. 2024. <https://doi.org/10.1134/S0016793224600103>
- Wing S., Newell P.T. Center plasma sheet ion properties as inferred from ionospheric observations // *J. Geophys. Res. – Space*. V. 103. № A4. P. 6785–6800. 1998. <https://doi.org/10.1029/97JA02994>

Latitudinal Distribution of Nighttime Auroral Precipitation During Magnetic Calm and Near the Time of Substorm Onset

V. G. Vorobjev¹, O. I. Yagodkina¹, E. E. Antonova^{2,3}, I. P. Kirpichev³

¹*Polar Geophysical Institute, Apatity, Murmansk Region, Russia*

²*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, Moscow, Russia*

³*Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

The unresolved problems of the physics of auroral substorms include the issue of localization and the mechanism of the start of the substorm expansion phase. The new information needed to solve this problem can be obtained by comparing the results of observations from low-altitude spacecraft with observations in the equatorial plane of the magnetosphere. For this purpose, the morphological projection method was used, which does not require knowledge about the configuration of the magnetic field. This paper considers the latitudinal profiles of the auroral precipitation characteristics at ionospheric altitudes obtained from DMSP F7 spacecraft observations and the radial distribution of ion pressure in the equatorial plane according to the THEMIS mission during periods of magnetic calm and at time intervals close to the auroral breakup. Special attention was paid to the position of the maximum energy flux of the precipitation of ions with energy larger than 3 keV and ion pressure profiles. The average ion pressure latitudinal profiles at low altitudes were determined and compared with the average pressure distributions in the equatorial plane of the magnetosphere under similar to averaged values of solar wind and geomagnetic activity parameters. It is shown that, if under geomagnetic calm the pressure maximum at low altitudes is mapped to geocentric distances of $\sim 7\text{--}8\text{ }Re$, before the substorm onset it is mapped to a distance of $\sim 5\text{--}6\text{ }Re$. The averaged values of the pressure maxima during the magnetic calm, as well as before and after substorm onset were obtained. The brightness of the auroral luminosity in the 557.7 nm emission was estimated from DMSP F7 observations of the average energy and energy flux of the precipitated electrons.

Keywords: auroral precipitation, magnetospheric substorm, substorm phases, ion pressure, latitudinal profiles and radial distributions of ion pressure, auroral brightness