

ДИНАМИКА НОЧНЫХ ГРАНИЦ АВРОРАЛЬНОГО ОВАЛА ВО ВРЕМЯ МАГНИТНОЙ БУРИ 27–29.V.2017

© 2022 г. А. Р. Иванова^{1, 2, *}, В. В. Калегаев^{1, 2}

¹Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ
им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. Москва, Россия

*e-mail: ivanova.ar20@physics.msu.ru

Поступила в редакцию 10.09.2021 г.

После доработки 21.04.2022 г.

Принята к публикации 04.05.2022 г.

По данным низкоорбитального спутника *Meteor M2* исследована динамика границ аврорального овала на ночной стороне в период магнитной бури, наблюдавшейся с 27.V по 29.V.2017. Исследовалась зависимость положения границ во время различных фаз бури от состояния магнитосферы и межпланетной среды. Экспериментально полученные данные о границах области высыпаний авроральных электронов сопоставлялись с данными, рассчитанными по статистической модели, разработанной независимо от данного исследования и определяющей положение овала в зависимости от величины *AL*-индекса. Получено, что во время начальной фазы бури главным фактором, повлиявшим на дальнейшую динамику овала, стал мощный продолжительный импульс давления солнечного ветра, который в сочетании с устойчивым южным межпланетным магнитным полем (ММП) привел к сжатию магнитосферы, уменьшению площади полярной шапки и расширению экваториальной границы овала. В период главной фазы и фазы восстановления бури давление солнечного ветра вернулось на добуриевой уровень, и динамика границ овала была связана с суббуриевой активностью и изменениями *Bz*-компоненты ММП: поворот ММП к югу на главной фазе привел к смещению овала на более низкие широты, а постепенное уменьшение по модулю южной компоненты обусловило сдвиг овала к полюсу на фазе восстановления. Показано, что полярная граница овала непосредственно реагирует на изменения в солнечном ветре, в то время как в динамике экваториальной границы присутствуют черты, связанные с геомагнитной активностью, с развитием магнитосферных токовых систем, опосредованно контролируемых параметрами межпланетной среды, в частности, интенсивностью крупномасштабной конвекции.

DOI: 10.31857/S0023420622050028

1. ВВЕДЕНИЕ

Магнитосферу Земли принято разделять на три основные области: внутреннюю, внешнюю и авроральную. Такое деление обусловлено общей структурой магнитосферного магнитного поля, формирующегося при взаимодействии солнечного ветра с собственным магнитным полем Земли [1]. Для данной работы главный интерес представляет авроральная магнитосфера — область, в которой происходит переход от вытянутой в хвост конфигурации магнитных силовых линий внешней магнитосферы к квазидипольной структуре магнитного поля внутренней магнитосферы. Такие магнитосферные образования как плазменный слой (его передняя часть) и авроральный овал являются ключевыми объектами этой области, характеризующими ее состояние. Это наиболее динамичная часть магнитосферы, в которой проявляются, как эффекты, связанные с воздей-

ствием солнечного ветра, так и эффекты внутри-магнитосферной динамики. Наблюдения аврорального овала позволяют диагностировать состояние магнитосферы, меняющееся под воздействием внешних и внутренних факторов.

Магнитосферное магнитное поле контролирует движение заряженных частиц. Поэтому в областях магнитосферы, различающихся интенсивностью и структурой магнитного поля, формируются популяции заряженных частиц, имеющие разные спектральные и пространственно-временные характеристики. В авроральной магнитосфере регистрируются изотропные потоки частиц с энергиями от десятков эВ до десятков кэВ (иногда до сотен).

Характерной особенностью авроральных силовых линий является их значительная искривленность в плазменном слое хвоста магнитосферы. Эта особенность магнитного поля проявляется в

движении магнитосферных заряженных частиц, главным образом, протонов и электронов надтепловых энергий. Заряженные частицы, ларморовский радиус которых близок к радиусу кривизны силовой линии, испытывают рассеяние по питч-углам в области плазменного слоя геомагнитного хвоста [2]. Частицы с малыми питч-углами, которые перемещаются вдоль силовой линии, достигая верхней атмосферы, вызывают полярные сияния. Область таких высыпаний авроральных частиц представляет собой смещенное на ночную сторону деформированное кольцо, которое окружает геомагнитный полюс – авроральный овал [3, 4]. В работе [5] дан обзор наземных исследований полярных сияний, позволивших в шестидесятых годах прошлого века приблизиться к концепции аврорального овала на основе локализованных во времени и пространстве наблюдений. Внутренняя область аврорального овала (полярная шапка) является основанием внешней магнитосферы, внешняя область – основанием внутренней магнитосферы, заполненной захваченными частицами.

Наряду с положением овала представляет интерес и его структура. В работе [6] подробно рассматривается морфология полярных сияний. Основными характеристиками, по которым классифицируют полярные сияния, являются: форма (лентообразные, диффузные и лучи), тип структуры (однородная, волокнистая (бороздчатая) и лучистая), яркость, активность и цвет. Все эти параметры позволяют делать выводы об интенсивности потоков частиц, высыпавшихся в атмосферу, что может характеризовать состояние магнитосферы. Возбужденные атомы верхней атмосферы излучают в видимом диапазоне, что наблюдается как полярное сияние, цвет которого складывается из совмещения нескольких наиболее характерных эмиссий. Цветовая и яркостная характеристики сияний позволяют сделать выводы об энергии высыпавшихся частиц, о глубине их проникновения в атмосферу.

Авроральный овал является чрезвычайно динамичным образованием магнитосферы. Вариации параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП) отражаются на структуре магнитосферы и приводят к почти мгновенным изменениям положения и формы овала. В работе [7] приведены свидетельства того, что смещение магнитопаузы под воздействием импульса давления солнечного ветра уже через две минуты приводит к флуктуациям овала.

Оптические измерения с борта космических аппаратов позволяют исследовать глобальную структуру авроральных свечений. В ходе наблюдений спутников *Polar* и *IMAGE* получено множество изображений овала полярных сияний, которые дают возможность изучать его динамику в течение длительного времени [8], исследовать его

вариации под воздействием геомагнитной активности и в ответ на изменение условий в межпланетной среде.

Регистрация потоков частиц на авроральных силовых линиях является одним из наиболее надежных методов определения границ овала полярных сияний. Измерения полярных спутников на высотах около 800 км позволяют надежно идентифицировать область плазменных вторжений, инициирующих оптические свечения в авроральной атмосфере [9].

В ходе геомагнитных возмущений наблюдаются значительные вариации магнитного поля, особенно заметные в области авроральной магнитосферы. Поэтому широтное расположение областей плазменных вторжений не постоянно при различных геомагнитных условиях. Были проведены многочисленные исследования динамики аврорального овала в зависимости от условий в магнитосфере и межпланетной среде. В ходе многоспутниковых наблюдений регистрируются искажения формы овала в обоих полушариях, связанные с вариациями магнитного поля [10]. В работе [11] было показано, что при увеличении магнитной активности на дневной стороне авроральный овал смещается к экватору, а на ночной стороне расширяется в обе стороны. В работе [12] исследовалось влияние давления солнечного ветра на размер и интенсивность свечения овала. Показано, что усиление давления солнечного ветра при южном направлении ММП приводит к расширению аврорального овала и уменьшению площади полярной шапки. В работе [13] на основе анализа базы данных изображений овала получены оценки положения его полярной границы в зависимости от компонент ММП. Показано, что смещение полярной границы овала в направлении полдень-полночь контролируется северо-южной компонентой ММП, а в направлении утро-вечер – *V_y*-компонентой ММП.

Особый интерес представляет динамика границ овала во время магнитной бури. Формирование крупномасштабных буревых токовых систем приводит к значительным изменениям формы, положения и интенсивности свечения овала. В работе [14] получены зависимости положения границ овала от уровня геомагнитной возмущенности. Авторами [15] было показано, что во время главной фазы магнитной бури на ночной стороне полярная граница остается примерно на одной и той же широте, а экваториальная граница смещается в сторону экватора. Построены количественные модели, связывающие положение овала с уровнем геомагнитной активности [16, 17].

Результаты проведенных исследований показывают, что, и состояние солнечного ветра, и уровень геомагнитной активности, являются факторами, влияющими на форму и положение овала.

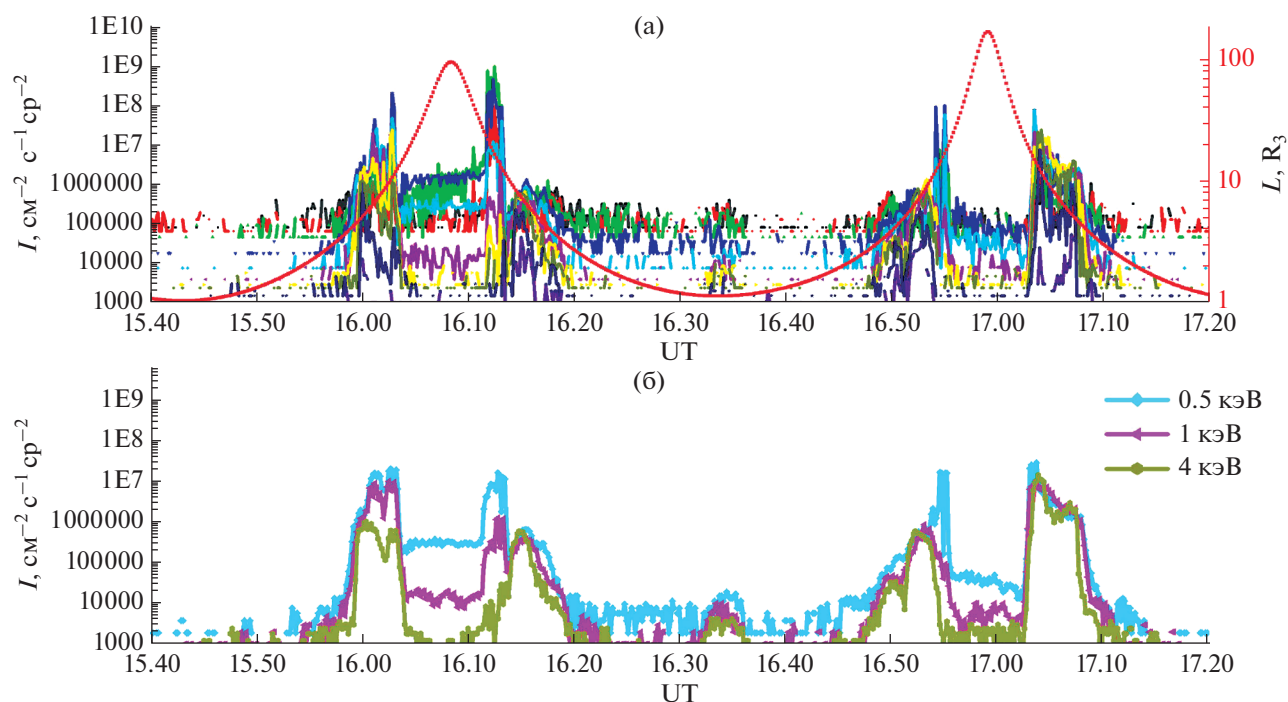


Рис. 1. Интенсивность потоков электронов различных энергий (от 0.032 до 16.64 кэВ) и значение параметра Мак-Илвайна по данным спутника *Meteor M2* за один оборот вокруг Земли (а), обработанные значения для потоков (б).

В работе [18] показано, что параметры солнечного ветра и параметры магнитосферных токов, совместно, определяют уровень авроральной активности. Целью данной работы является определение относительной роли факторов межпланетной среды и магнитосферных факторов в динамике овала во время разных фаз магнитной бури, наблюдавшейся 27–29.V.2017. Данная, необычная, магнитная буря инициировалась сильным импульсом давления солнечного ветра (до 18 нПа) и экстремальным сжатием магнитосферы (расстояние до подсолнечной точки уменьшилось в 2 раза), которое продолжалось почти до конца главной фазы бури. Для исследований был разработан метод определения ночных границ аврорального овала по потокам высыпавшихся в атмосферу заряженных частиц по данным измерений российского спутника *Meteor M2*, который ранее редко использовался в подобных исследованиях. Проведено сопоставление экспериментальных данных и результатов расчетов, полученных с помощью статистической модели [17]. Поскольку модель учитывает зависимость положения овала только от магнитосферных процессов, возможные согласия/несогласия экспериментальных и теоретических результатов могут свидетельствовать о роли параметров солнечного ветра и ММП.

2. ДАННЫЕ

Для определения положения границ овала были использованы данные низкоэнергичных кана-

лов электростатического анализатора, входящего в состав инструмента МСГИ низкоорбитального полярного спутника *Meteor M2*, измеряющего интенсивность потока авроральных электронов с энергиями от 0.032 до 16.64 кэВ. Данный спутник располагается на круговой орбите с наклоном 97° и высотой 880 км. Он совершает полный оборот вокруг Земли примерно за 100 мин, и за это время авроральный овал регистрируется 4 раза по возрастаниям потоков высыпавшихся частиц: в ночном и дневном секторах северного и южного полушарий. *Meteor M2* имеет полярную солнечно-синхронную орбиту, и пересечения овала всегда происходят в предполуденном и предполуденном секторах локального времени.

На рис. 1а представлен пример данных, полученных за один оборот спутника 28.V.2017 15.40–17.20 UTC. Линии разных цветов (кроме красной) характеризуют интенсивности потоков авроральных электронов различных энергий (десять каналов от 0.032 до 16.64 кэВ). Данные получены с временным разрешением 10 с.

Красная линия соответствует значениям координаты L , изменяющейся вдоль орбиты. Низкие значения параметра свидетельствуют о нахождении спутника во внутренней магнитосфере, где доминирует внутреннее магнитное поле Земли. Здесь значение этого параметра характеризует L -оболочку – поверхность, образованную силовыми линиями магнитного поля, а L равно рас-

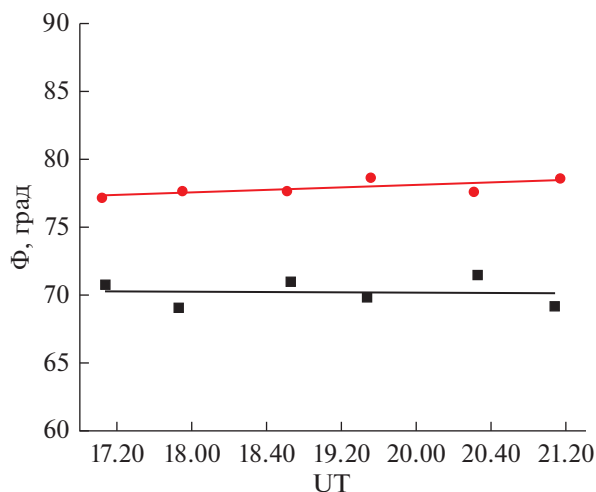


Рис. 2. Вариации положения полярной (красные точки и аппроксимирующая красная кривая) и экваториальной (черные точки и аппроксимирующая черная кривая) границ аврорального овала в спокойный период.

стоянию от центра Земли до силовой линии в плоскости геомагнитного экватора.

Во внешней магнитосфере, которая проецируется в более высокие широты, становится значимым вклад магнитосферных токов в магнитное поле. Здесь физический смысл этого параметра теряется, поэтому он используется только как величина, характеризующая геомагнитную широту ионосферной проекции точки. Максимальным значениям L соответствуют полярные шапки, которые на графике окружены с двух сторон “горбами”: областями возрастания потоков, связанными с высыпанием электронов в овал полярных сияний. Границы областей высыпаний характеризуют положение овала полярных сияний и могут быть определены из анализа данных измерений спутника *Meteor M2*.

3. МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Из рис. 1а можно видеть, что данные измерений спутника носят дискретный характер, связанный с низким геометрическим фактором электростатического анализатора, установленного на аппарате. Эта особенность прибора, а также низкое временное разрешение измерений в плазменных каналах (10 с), затрудняют точное определение границ высыпаний. В работе использовался метод скользящего среднего, позволяющий устранить дискретность и получить сглаженные значения потоков для каждого энергетического канала. Значение в каждой точке рассчитывалось как среднее арифметическое значений в двух предыдущих и в двух последующих точках. На рис. 1б представлены обработанные значения для

потоков электронов в каналах 0.5, 1 и 4 кэВ. Полученные профили позволяют легче идентифицировать границы области высыпаний, чем исходные данные. Будем определять границы области высыпаний электронов на орбите спутника по временным профилям усредненных потоков, полученных для частиц с энергиями 1 кэВ.

За каждый оборот спутника в период изучаемой магнитной бури были построены усредненные профили, аналогичные представленным на рис. 1б. Для ночного участка орбиты были определены L -координаты пересечений спутником полярной и экваториальной границ областей высыпаний в северном и южном полушариях. Была вычислена исправленная геомагнитная широта (или “инвариантная широта”) этих точек, которая однозначно характеризует L -оболочки во внутренней магнитосфере и учитывает их искажение, связанное с недипольными источниками внутреннего магнитного поля Земли:

$$\Phi = \arccos \sqrt{1/L}.$$

Ошибки определения L связаны с временным разрешением массива данных (10 с) и составляют около 0.5 радиусов Земли, ошибки определения широты составляет величину около $\pm 0.3^\circ$.

4. ГРАНИЦЫ ОВАЛА В СПОКОЙНЫХ УСЛОВИЯХ

Наряду с временными вариациями границ овала, вызванными буревыми токами в магнитосфере, спутник регистрирует в течение суток вариации овала связанные с вращением Земли. Наклон геомагнитного диполя к оси вращения Земли и недипольные гармоники в разложении скалярного потенциала внутреннего поля приводят к его азимутальной асимметрии. Поэтому, в географических и, в геомагнитных координатах, будут наблюдаться суточные вариации границ овала даже в геомагнитно-спокойные периоды. Использование исправленных геомагнитных координат позволяет выделить вариации овала, связанные исключительно с буревой динамикой магнитосферы.

На рис. 2 представлены временные профили исправленной геомагнитной широты полярной и экваториальной границ аврорального овала на ночном участке орбиты КА *Meteor M2* в течение 17.00–21.20 10.III.2020. В этот период времени в солнечном ветре и в магнитосфере регистрировались спокойные условия: значения геомагнитного индекса Dst и Bz -компоненты межпланетного магнитного поля (ММП) были положительны и находились около нуля, скорость солнечного ветра приблизительно равнялась 325 км/с.

Предполагая магнитную сопряженность границ овала в северном и южном полушарии, мы

объединили массивы значений широт полярной и экваториальной границ, полученных в северном и южном полушариях. Полученные временные профили инвариантных широт экваториальной и полярной границ аппроксимировались кривой второго порядка.

Можно видеть, что, в спокойных условиях исправленная геомагнитная широта ночных границ аврорального овала почти не изменяется и составляет примерно 70° для экваториальной границы и 78° для полярной.

5. МАГНИТНАЯ БУРЯ 27–29.V.2017

Развитие буревых токовых систем под воздействием ускоренных потоков солнечного ветра и вариаций ММП приводит к изменениям структуры магнитосферного поля в авроральной магнитосфере и к вариациям аврорального овала. Рассмотрим условия в околоземном космическом пространстве в период с 27 по 29.V.2017 (рис. 3). Геомагнитные возмущения связаны с формированием крупномасштабных токов (буревых токовых систем), изменяющих структуру магнитосферы. Развитие магнитосферных токов во время магнитной бури характеризуется временным профилем геомагнитного индекса *Dst*, описывающего среднюю вариацию магнитного поля, измеряемого наземными низкоширотными станциями. Приведенный график *Dst* имеет типичный для периода магнитной бури вид. Резкое увеличение этого индекса (“внезапное начало бури” – *SSC*) соответствует фазе начала бури, последующее уменьшение *Dst* соответствует главной фазе, которая завершается фазой восстановления.

Начало магнитной бури связано с приходом к Земле потока ускоренного солнечного ветра. Можно видеть, что 27.V примерно в 15:45 наблюдается внезапный скачок скорости и плотности солнечного ветра – началась фаза начала бури, характеризующаяся ростом *Dst*. Магнитосфера сжимается под воздействием потока ускоренной плазмы солнечного ветра. 27.V в 21.36 ММП поворачивается к югу (компонента *Bz* становится отрицательной), и начинается главная фаза бури (*Dst* в этот момент начинает уменьшаться), обусловленная развитием буревых токов хвоста магнитосферы и кольцевого тока [19]. 28.V в 08.00 *Dst* снова начинает возрастать, это свидетельствует о том, что кольцевой ток начинает распадаться – главная фаза бури закончилась, началась фаза восстановления. Магнитосфера в это время возвращается в спокойное состояние. Таким образом, можно выделить примерные временные интервалы для фаз данной бури:

- 15.45–21.36 UT (27.V.2017) – фаза начала бури
- 21.36 UT (27.V.2017)–08.00 UT (28.V.2017) – главная фаза бури

- 08.00 UT (28.V.2017)–10.00 UT (29.V.2017) – фаза восстановления бури.

6. РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассмотрим динамику границ овала в каждую фазу магнитной бури. По приведенной в разделах 2, 3 методике были получены временные профили ночных границ аврорального овала, представленные на рис. 4.

Можно видеть, что во время фазы начала бури наблюдается расширение овала с 4° до 20° вблизи полуночи (изменение экваториальной границы с 68° до 63° и полярной с 72° до 83°), что свидетельствует об уменьшении площади полярной шапки. В период главной фазы бури экваториальная граница изменяется в пределах 54° – 60° , полярная – 68° – 74° . В фазу восстановления бури происходит смещение овала к полюсу: синхронное возрастание широты обеих границ (экваториальная с 54° до 68° , полярная с 70° до 85°). Можно видеть, что во время как экваториальная граница демонстрирует плавное поведение, полярная испытывает значительные вариации, связанные, по-видимому, с изменениями, происходящими в солнечном ветре.

Вследствие наклона момента геомагнитного диполя относительно оси вращения Земли авроральный овал смещен относительно географического полюса. Поэтому, при наклонении орбиты КА 97° на некоторых витках вокруг Земли (на отдельных долготах) спутник не достигает полярной границы овала. В частности, фаза восстановления бури была исследована только до 03.00 29.V.2017 из-за того, что начиная с этого момента и до окончания магнитной бури, спутник не пересек полярную границу аврорального овала.

7. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные временные профили описывают динамику ночных границ овала по данным спутника *Meteor M2*. Можно видеть, что на каждой фазе магнитной бури наблюдаются характерные изменения положения овала, связанные с вариациями магнитосферы под воздействием солнечного ветра и ММП.

В работе [9] была предложена классификация областей различных высыпаний с определенными для них границами. Для данной работы интересно рассмотрение следующих границ:

b2e – граница, выше которой с ростом широты перестает увеличиваться энергия электронов (характеризует ближний край центрального плазменного слоя). Служит для определения экваториальной границы аврорального овала.

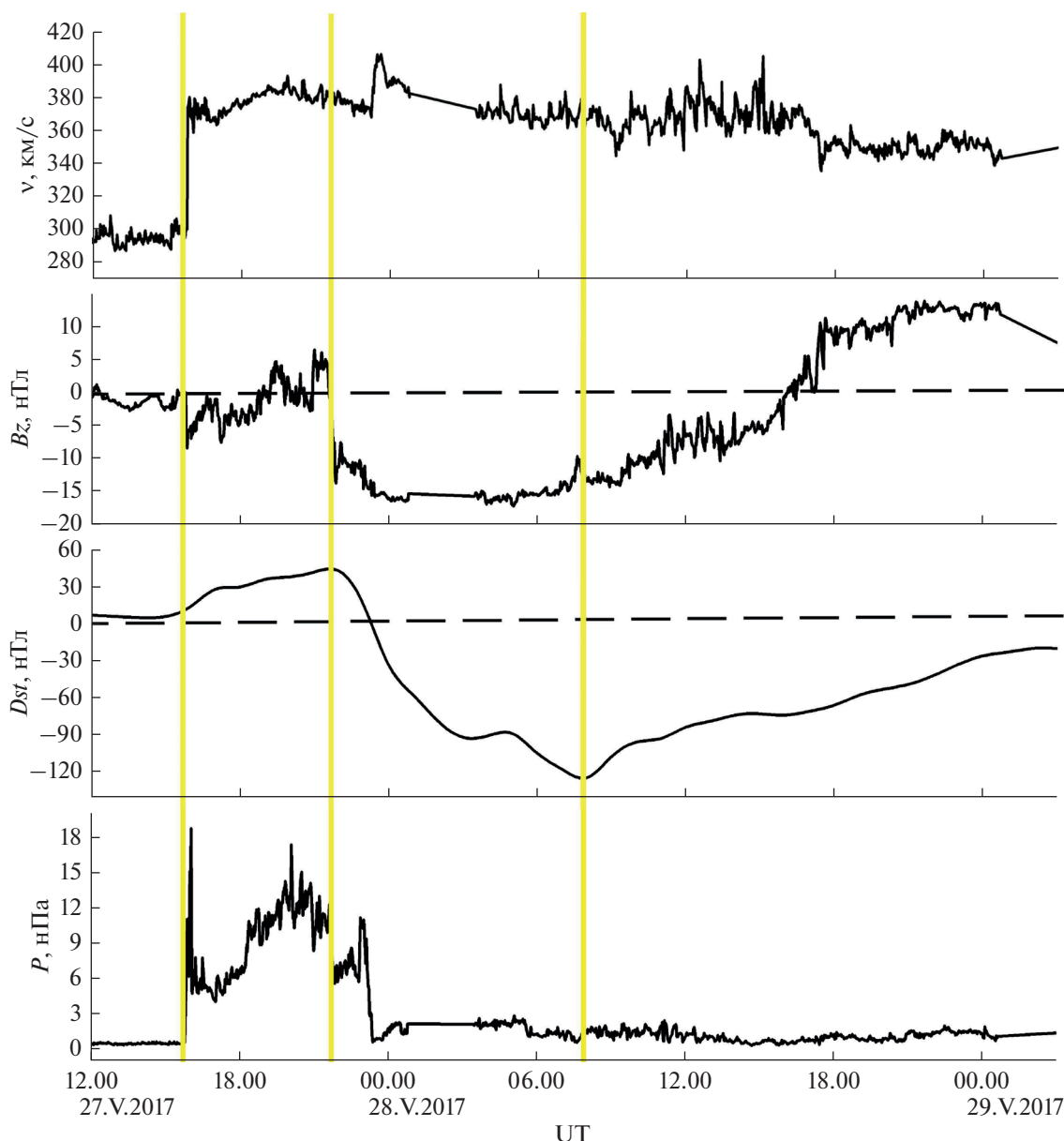


Рис. 3. Скорость солнечного ветра (v), величина B_z -компоненты межпланетного магнитного поля (B_z), величина Dst -индекса (Dst), давление солнечного ветра (P) в период с 27.V по 29.V. 2017. Вертикальные желтые линии обозначают границы между фазами бури.

$b5e$ – полярная граница аврорального овала, где поток частиц изменяется как минимум в 4 раза при изменении широты на 0.2° .

В работе [17] на основе данных спутников *DMSP* за 1986 г. была разработана модель, связывающая положение овала с уровнем геомагнитной (авроральной) активности. В этой модели границы различных областей плазменных вторжений по классификации [9] аппроксимируются полиномами второй степени от модуля геомагнитного индекса AL :

$$\Phi = 67.4 - 0.016 |AL| + 0.79 \cdot 10^{-5} AL^2,$$

для экваториальной границы,

$$\Phi = 70.77 + 0.007 |AL| - 0.35 \cdot 10^{-5} AL^2,$$

для полярной границы.

Проанализируем эти зависимости. Полярная граница, рассчитываемая по данной модели, для разумных значений AL -индекса располагается в интервале широт от 70.77° до 74.27° . Из рис. 4 видно, что в ряде случаев экспериментально определенная полярная граница выходит в высокие ши-

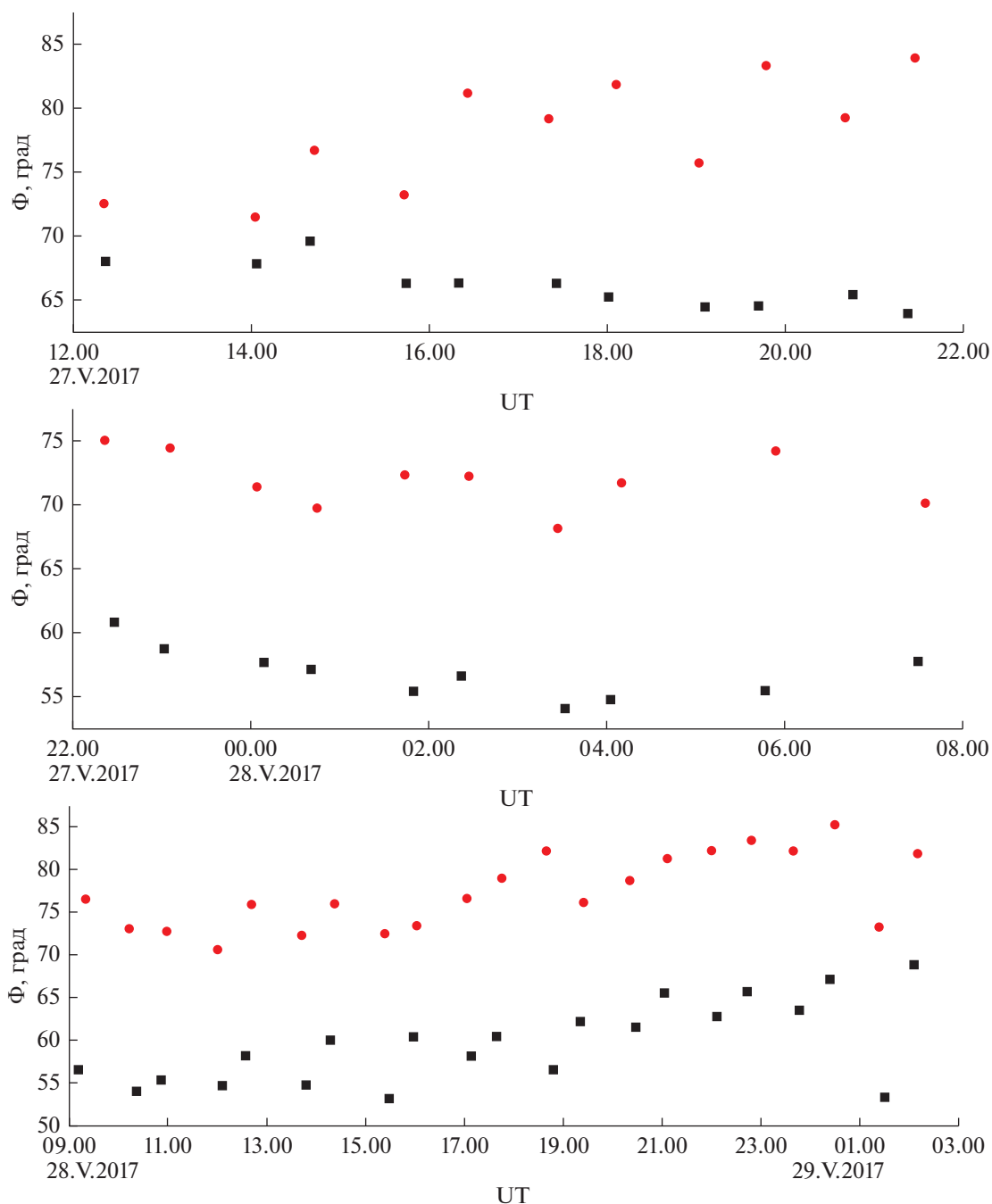


Рис. 4. Вариации полярной (красные точки) и экваториальной (черные точки) границ овала отдельно для каждой фазы бури (расположены в хронологическом порядке сверху вниз – фаза начала, главная фаза, фаза восстановления бури).

роты далеко за пределы области модельных значений. Для экваториальной границы область значений составляет от 59.4° до 67.4° . И в этом случае наблюдается, хотя и не столь значительное, расхождение с наблюдениями: в главную фазу бури происходит более значительное смещение экваториальной границы на низкие широты.

Таким образом, значительная амплитудная динамика положения экспериментальной грани-

цы не может быть описана моделью [17], что свидетельствует о роли иных, чем AL , параметров, воздействующих на авроральную магнитосферу. В дальнейшем, при сопоставлении полученных результатов и модели основное внимание будет уделено сходствам и различиям общей динамики границ.

На рис. 5а и 5б представлены временные профили широты полярной и экваториальной гра-

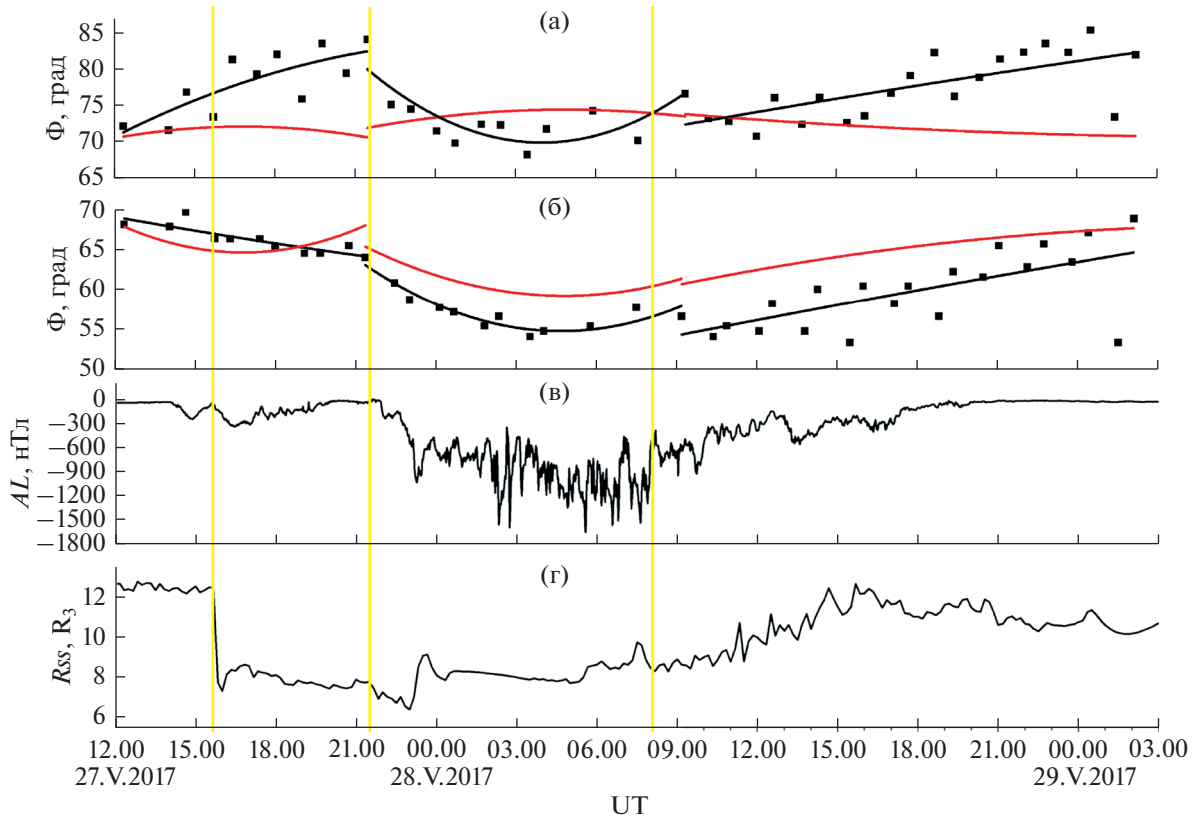


Рис. 5. Вариации экспериментальной (отдельные черные кривые для каждой фазы бури) и модельной (отдельные красные кривые для каждой фазы) исправленной геомагнитной широты экваториальной (а) и полярной (б) границ аврорального овала, величина AL -индекса (в), расстояние до подсолнечной точки (г). Вертикальные желтые линии обозначают границы между фазами бури.

ниц ночного овала $b5e$ и $b2e$, полученные по данным *Meteor M2* и с использованием модели [17] на всем интервале развития магнитной бури. Модельные и экспериментальные значения аппроксимированы полиномами второй степени для каждой фазы бури. Среднеквадратичное отклонения в модели составляет величину $\pm 1^\circ - 2^\circ$. Рассмотрим по-отдельности динамику обеих границ.

7.1. Полярная граница овала

Полярная граница разделяет авроральную и внешнюю магнитосферу. Внутренняя область овала — полярная шапка, связана магнитными силовыми линиями с межпланетной средой и контролируется условиями в солнечном ветре [18, 20].

Поэтому, на положение полярной границы влияют не только магнитосферные процессы, происходящие в авроральной магнитосфере, но и процессы, происходящие в межпланетной среде, для характеристики которых служат параметры солнечного ветра и ММП [13, 21]. В работе [15] было показано, что положение полярной границы достаточно слабо зависит от геомагнитной активности даже во время сильных магнитных бурь, поэтому не следует ожидать, что модель [17] смо-

жет с высокой точностью описать динамику этой границы.

На рис. 5а можно видеть, что, теоретическая и экспериментальная кривые, описывающие положение полярной границы, имеют разные профили — кривые имеют разные функциональные зависимости на всех фазах магнитной бури, что может быть обусловлено неучтенными в модели процессами в межпланетной среде.

Во время фазы начала бури полярная граница поднимается по широте на 10° : овал расширяется и уменьшается площадь области открытых силовых линий. В работе [12] было исследовано изменение положения аврорального овала после импульса давления солнечного ветра при различных направлениях ММП и было получено, что импульс давления приводит к быстрому расширению овала и уменьшению площади полярной шапки. Было показано, что в ходе события 2.X.1998 продолжительный импульс давления привел к смещению полярной границы на более высокие широты на 10° . При этом продолжительность импульса давления амплитудой 10 нПа составляла более трех часов. Похожая ситуация наблюдается и в исследуемой буре. В течение девяти

часов давление солнечного ветра достигало значений 10 нПа, за это время исправленная геомагнитная широта овала на околополуночном меридиане изменилась от 72° до 82° .

Во время сильного полярного расширения овала, зарегистрированного спутником вблизи полуночи на начальной фазе бури, широта модельной границы изменялась незначительно. Можно сделать вывод, что динамика полярной границы во время фазы начала бури обусловлена в большей степени изменениями в солнечном ветре, которые не учитываются в модели, в то время как экспериментальная граница мгновенно реагирует на эти изменения.

Параметры солнечного ветра проявляются в суббулевой динамике магнитосферы с задержкой, опосредованно, через механизмы накопления энергии в хвосте и реализации ее в авроральных активациях [22]. В работе [23] было показано, что геомагнитные индексы реагируют с задержкой примерно 35 мин на изменения B_z -компоненты ММП и около 5 мин на изменение давления солнечного ветра.

Главная фаза бури началась резким падением B_z -компоненты ММП от $+5$ до -15 нТл, что обусловило расширение полярной шапки примерно на 10 градусов. Увеличение площади полярной шапки в интервале с 21.00 27.V.2017 до 04.00 28.V.2017 является ожидаемым поведением полярной границы овала и очевидно связано с устойчивым южным ММП после его резкого поворота к югу в начале главной фазы (см. [13, 24–26]).

Дальнейшие изменения положения полярной границы во время главной фазы бури определяются медленным изменением B_z -компоненты ММП. По мере плавного уменьшения по модулю южной компоненты B_z и последующего поворота ММП к северу происходит постепенное возрастание широты полярной границы и уменьшение площади полярной шапки. В работе [24] отмечалось, что увеличение модуля южной компоненты ММП приводит к расширению полярной шапки, при этом ее граница смещается на 0.5° – 1° при изменении южной B_z ММП на 1 нТл (см. также [13, 21]). Наблюдаемое смещение на 7° находится в согласии с изменением ММП.

Согласно исследованию, которое проводилось в [27], при усилении северной компоненты B_z ММП полярная граница ночной стороны овала смещается к полюсу. Однако, как правило, требуется достаточно много времени после поворота ММП на север, чтобы размер полярной шапки существенно уменьшился (например, около 15 ч может потребоваться для сдвига к полюсу на 5°). По результатам [13], смещение границы овала до широт, соответствующих значению $B_z > 0$ ММП, может продолжаться в течение 25 и более часов. Полученные экспериментальные данные соот-

ветствуют этим утверждениям — видно, что после поворота ММП на север широта полярной границы монотонно возрастала и за 10 часов поднялась на 6 градусов (до 82°).

На протяжении всех фаз магнитной бури динамика модельной полярной границы, вариации ее положения, не соответствуют динамике экспериментальной. Это яркое свидетельство доминирующей роли параметров межпланетной среды в вариациях авроральной магнитосферы. Динамике полярной границы овала обусловили продолжительный период высокого давления солнечного ветра, резкий поворот ММП к югу и медленный переход от южного направления ММП к северному.

7.2. Экваториальная граница овала

Экваториальная граница овала разделяет внутреннюю и авроральную магнитосферу. Поэтому положение экваториальной границы в значительной степени определяется состоянием магнитосферы и уровнем геомагнитной активности. Рис. 5б демонстрирует схожую динамику модельной и экспериментальной кривых, описывающих экваториальную границу овала: можно видеть расширение овала по мере развития магнитной бури и последующее восстановление его добуревых пространственных характеристик.

На рис. 5г приведен график изменения расстояния до подсолнечной точки на магнитопаузе, отражающий степень сжатия дневной магнитосферы. Приведенные величины были рассчитаны по модели [28] в центре космической погоды НИИЯФ МГУ (<https://swx.sinp.msu.ru>). В спокойных условиях магнитопауза находилась на расстоянии 13–14 радиусов Земли, а в момент начала магнитной бури приблизилась до 6 радиусов. Можно видеть, что “сжатое” состояние магнитосферы регистрировалось достаточно долго: почти до конца главной фазы бури расстояние до подсолнечной точки составляло около 7 радиусов, а в спокойное состояние магнитосфера вернулась только на поздней стадии фазы восстановления, когда B_z компонента ММП приняла устойчивые положительные значения. Сжатие магнитосферы при усилении давления солнечного ветра приводит к расширению овала [24, 25] и объясняет не только уменьшение размеров полярной шапки, но и понижение широты экваториальной границы овала во время фазы начала бури [12]. Можно ожидать, что смещение овала на низкие широты поддерживается развитием буревых токовых систем, прежде всего кольцевого тока и токов хвоста магнитосферы. На главной фазе бури они понижают магнитный поток через экваториальную плоскость во внутренней магнитосфере, что приводит к смещению к Земле границы области захвата и расширению овала [18, 29].

Таким образом, во время фазы начала бури динамика экваториальной границы была обусловлена резким скачком давления солнечного ветра и последующим сжатием магнитосферы (граница опустилась на 5°).

В ряде исследований отмечается, что положение экваториальной границы овала определяется уровнем геомагнитной активности и хорошо коррелирует с Dst [16, 18, 24]. В работе [30] отмечено, что при южном направлении ММП параметр VBz , где V – скорость солнечного ветра, а Bz – южная компонента ММП, наилучшим образом определяет динамику экваториальной границы аврорального овала. В работе [18] отмечалось, что интенсивность кольцевого тока является одним из факторов, контролирующих размер аврорального овала. Поскольку VBz при южном направлении ММП характеризует интенсивность магнитосферной конвекции и во время магнитной бури является параметром, контролирующим интенсивность кольцевого тока магнитосферы [31], можно предположить, что расширение овала на главной фазе бури связано с соответствующей вариацией VBz .

На главной фазе бури профили модельной и экспериментальной границ близки (разница не превышает 4°), что свидетельствует об обоснованности использования AL -индекса в качестве параметра, влияющего на положение экваториальной границы овала. Продолжительная суббуревая активность стала одним из важных факторов развития магнитной бури и расширения овала на ее главной фазе.

Во время фазы восстановления бури, когда суббуревая активность прекратилась, а также не происходили резкие изменения в потоке солнечного ветра, экспериментальная кривая изменяется синхронно с модельной и обе выходят на добуравой уровень.

Таким образом, из сопоставления профилей модельной и экспериментальной экваториальных границ, можно сделать вывод, что внутримагнитосферные процессы оказывают большее влияние на ее положение. В то же время параметры межпланетной среды также оказывают воздействие на авроральный овал, вызывая его дополнительное смещение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным спутника *Meteor M2* было исследовано изменение положения аврорального овала во время различных фаз магнитной бури, наблюдавшейся с 27 по 29.V.2017. Проведено сравнение данных, полученных на основе экспериментальных измерений и модельных расчетов (модель представлена в работе [17]), позволяющее оце-

нить роль разных факторов, определяющих воздействие солнечного ветра на положение овала.

Во время фазы начала бури наблюдается расширение аврорального овала в обе стороны, чему в большей степени способствовал импульс давления солнечного ветра. Импульс давления при устойчивом южном ММП привел к возрастанию широты полярной границы на 10° , а сжатие магнитосферы при увеличении давления к расширению экваториальной границы на 5° . Для экваториальной границы наблюдается хорошее совпадение экспериментального и модельного временных профилей.

Динамика полярной границы в период главной фазы бури в основном определяется вариацией Bz -компоненты ММП. Наблюдаются близкие широты экспериментальной и модельной кривых, хотя их динамика противоположна: в максимуме бури широта экспериментально-полученной полярной границы минимальна, в то время как расчеты дают максимальное значение. Для экваториальной границы модельный и экспериментальный профили близки, что свидетельствует об обоснованности использования AL -индекса в качестве параметра, контролирующего положение экваториальной границы овала. Продолжительная суббуревая активность стала одним из важных факторов расширения овала на ее главной фазе.

В фазу восстановления бури происходит сужение “модельного” овала, что связано с понижением суббуревой активности в магнитосфере. В реальности, полярная граница плавно смещается на более высокие широты в условиях северного направления ММП. Экваториальная граница восстанавливает добуравые значения, изменяясь синхронно с модельной кривой.

Можно видеть, что полярная граница овала непосредственно реагирует на изменения в солнечном ветре, в то время как в динамике экваториальной границы присутствуют черты, связанные с геомагнитной активностью, с развитием магнитосферных токовых систем, опосредованно контролируемых параметрами межпланетной среды, в частности, интенсивностью крупномасштабной конвекции.

Данные спутника *Meteor M2* доступны на сайте Центра данных оперативного космического мониторинга НИИЯФ МГУ (<http://swx.sinp.msu.ru>). Данные по геомагнитным индексам получены из World Data Center C2 for Geomagnetism, Kyoto. Данные по солнечному ветру получены из базы данных OMNIweb. Исследование частично поддержано научной программой Национального центра физики и математики (проект “Ядерная и радиационная физика”).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лазутин Л.Л.* Мировые и полярные магнитные бури: учебное пособие. М.: МГУ, 2012.
2. *Sergeev V.A., Sazhina E.M., Tsyganenko N.A. et al.* Pitch-angle scattering of energetic protons in the magnetotail current sheet as the dominant source of their isotropic precipitation into the nightside ionosphere // *Planet. Space Sci.* 1983. V. 31. № 10. P. 1147–1155.
3. *Фельдштейн Я.И.* Географическое распределение полярных сияний и азимуты дуг // *Исследования полярных сияний.* 1960. № 4. С. 61–78.
4. *Хорошева О.В.* Пространственно-временное распределение полярных сияний и их связь с высокоширотными геомагнитными возмущениями // *Геомагнетизм и аэрономия.* 1961. Т. 1. С. 695–701.
5. *Фельдштейн Я.И.* Открытие и первые исследования аврорального овала // *Геомагнетизм и аэрономия.* 2016. Т. 56. № 2. С. 139–153.
6. *Исаев С.И.* Морфология полярных сияний. Ленинград: Наука, 1968.
7. *Briggs J.K., Fasel G.J., Silveira M. et al.* Dayside auroral observation resulting from a rapid localized compression of the earth's magnetic field // *J. Geophys. Res. Letters.* 2020. V. 47. № 19. P. e2020GL088995.
8. *Mende S.B., Heeterks H., Frey H.U. et al.* Far ultraviolet imaging from the *IMAGE* spacecraft. 1. System design // *Space Sci. Rev.* 2000. V. 91. № 1–2. P. 243–270.
9. *Newell P.T., Feldstein Y.I., Galperin Y.I. et al.* Morphology of nightside precipitation // *J. Geophys. Res. Letters.* 1996. V. 101. № A5. P. 10737–10748.
10. *Zhang Y., Paxton L.J., Lui A.T.Y.* An unusual nightside distortion of the auroral oval: TIMED/GUVI and *IMAGE*/FUV observations // *J. Geophys. Res. Space Physics.* 2006. V. 111. № A8.
11. *Feldstein Y.I., Galperin Y.I.* The Auroral Luminosity Structure in the High Latitude Upper Atmosphere: Its Dynamics and Relationship to the Large-Scale Structure of the Earth's Magnetosphere // *Reviews of Geophysics.* 1985. V. 23. № 3. P. 217–275.
12. *Boudouridis A., Zesta E., Lyons L.R. et al.* Effect of solar wind pressure pulses on the size and strength of the auroral oval // *J. Geophys. Res. Letters.* 2003. V. 108. № A4. <https://doi.org/10.1029/2002JA009373>
13. *Лукьянова Р., Козловский А.* Динамика полярной границы аврорального овала по данным спутника *IMAGE* // *Космич. исслед.* 2013. Т. 51. № 1. С. 53–53.
14. *Feldstein Y.I., Starkov G.V.* Dynamics of auroral belt and polar geomagnetic disturbances // *Planetary and Space Science.* 1967. V. 15. № 2. P. 209–229.
15. *Воробьев В.Г., Ягодкина О.И.* Динамика авроральных высыпаний в периоды сильных магнитных бурь // *Геомагнетизм и аэрономия.* 2007. Т. 47. № 2. С. 198–205.
16. *Старков Г.В.* Математическое описание границ аврорального свечения // *Геомагнетизм и аэрономия.* 1994. Т. 34. № 3. С. 80–86.
17. *Воробьев В.Г., Громова Л.И., Реженев Б.В. и др.* Вариации положения границ плазменных вторжений и аврорального свечения в ночном секторе // *Геомагнетизм и аэрономия.* 2000. Т. 40. № 3. С. 1–7.
18. *Heritage G.L., Milan D.J., Large A.R. et al.* Influence of survey strategy and interpolation model on DEM quality // *Geomorphology.* 2009. V. 112. № 3–4. P. 334–344.
19. *Alexeev I.I., Belenkaya E.S., Kalegaev V.V. et al.* Magnetic storms and magnetotail currents // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101. № 4. P. 7737–7747.
20. *Hosokawa K., Kullen A., Milan S. et al.* Aurora in the polar cap: A review // *Space Science Reviews.* 2020. V. 216. № 1. P. 1–44.
21. *Wang C., Wang J.Y., Lopez R.E. et al.* Effects of the interplanetary magnetic field on the location of the open-closed field line boundary // *J. Geophys. Res. Space Physics.* 2016. V. 121. № 7. P. 6341–6352. <https://doi.org/10.1002/2016JA022784>
22. *Kozyra J.U., Liemohn M.W.* Ring Current Energy Input and Decay // *Space Sci. Rev.* 2003. V. 109. P. 105–131.
23. *Maggiolo R., Hamrin M., De Keyser J. et al.* The delayed time response of geomagnetic activity to the solar wind // *J. Geophys. Res. Space Physics.* 2017. V. 122. № 11. P. 11–109.
24. *Meng C.I., Makita K.* Dynamic variations of the polar cap // *Solar Wind Magnetosphere Coupling.* 1986. V. 126. P. 605–631.
25. *Holzworth R.H., Meng C.I.* Mathematical representation of the auroral oval // *J. Geophys. Res. Letters.* 1975. V. 2. № 9. P. 377–380.
26. *Alexeev I.I., Belenkaya E.S., Kalegaev V.V. et al.* Electric fields and field-aligned current generation in the magnetosphere // *J. Geophys. Res.* 1993. V. 98. № 3. P. 4041–4051.
27. *Lee D.Y., Ohtani S., Lee J.H.* On the poleward boundary of the nightside auroral oval under northward interplanetary magnetic field conditions // *J. Geophys. Res. Space Physics.* 2010. V. 115. № A8.
28. *Shue J.-H., Chao J.K., Fu H.C. et al.* Magnetopause location under extreme solar wind conditions // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. P. 17691–17700.
29. *Meng C.I.* Dynamic variation of the auroral oval during intense magnetic storms // *J. Geophys. Res. Space Physics.* 1984. V. 89. № A1. P. 227–235.
30. *Hardy D.A., Burke W.J., Gussenhoven M.S. et al.* DMSP/F2 electron observations of equatorward auroral boundaries and their relationship to the solar wind velocity and the north-south component of the interplanetary magnetic field // *J. Geophys. Res. Space Physics.* 1981. V. 86. № A12. P. 9961–9974.
31. *Burton R.K., McPherron R.L., Russell C.T.* An empirical relationship between interplanetary conditions and Dst // *J. Geophys. Res.* 1975. V. 80. P. 4204–4214.