

УДК 550.383

ВАРИАЦИЯ ДАВЛЕНИЯ ПЛАЗМЫ НА ШИРОТАХ АВРОРАЛЬНОГО ОВАЛА ДО, ВО ВРЕМЯ И ПОСЛЕ ИЗОЛИРОВАННОЙ ГЕОМАГНИТНОЙ СУББУРИ 22 ДЕКАБРЯ 2008 ГОДА

© 2020 г. М. Рохас-Гамарра^{1, *}, Х. Гонзалес^{2, **},
М. В. Степанова^{2, ***}, Е. Е. Антонова^{3, 4, ****}

¹Физический факультет, Национальный университет Сан-Антонио Абад де Куско, г. Куско, Перу

²Физический факультет, Университет Сантьяго де Чили, г. Сантьяго, Чили

³Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (НИИЯФ МГУ), г. Москва, Россия

⁴Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), г. Москва, Россия

*e-mail: mrojagamarra@gmail.com

**e-mail: juan.gonzalesgo@usach.cl

***e-mail: marina.stepanova@usach.cl

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

Поступила в редакцию 29.12.2019 г.

После доработки 12.01.2020 г.

Принята к публикации 23.01.2020 г.

Исследовано изменение давления плазмы на широтах аврорального овала до, во время и после изолированной геомагнитной суббури 22 декабря 2008 г. по данным спутников DMSP F13, 15, 16 и 17. Особенностью рассмотренного события являлся длительный период близких к нулю значений AL -индекса, во время которого произошло более чем двукратное нарастание динамического давления солнечного ветра. Проведено проецирование максимумов давления на экваториальную плоскость с использованием моделей геомагнитного поля и модели распределения давления в экваториальной плоскости. Показано, что максимальные значения давления плазмы на широтах аврорального овала возрастают при увеличении динамического давления солнечного ветра в магнитоспокойный период до суббури. Во время взрывной фазы суббури регистрируются максимальные за исследуемый период значения давления плазмы. Падение динамического давления солнечного ветра до значений, близких к значениям данной величины в магнитоспокойное время перед суббурей, не сопровождалось падением давления плазмы после суббури. Обсуждается отличие динамики давления плазмы во время изолированной суббури от динамики давления суббурь во время магнитной бури.

DOI: 10.31857/S0016794020040148

1. ВВЕДЕНИЕ

Давление плазмы является ключевой величиной, определяющей стабильность и динамику плазменной конфигурации. В течение последних десятилетий были накоплены убедительные доказательства того, что крупномасштабные структуры плазмы в магнитосфере Земли находятся, в основном, в состоянии магнитостатического равновесия, которое сохраняется даже при наличии турбулентности. [Овчинников и Антонова, 2017; Stepanova et al., 2019, и ссылки в этих работах]. Однако до настоящего времени еще не до конца понятно, как магнитосферные структуры достигают равновесия и какие конкретные условия необходимы для его поддержания. Большие изменения давления плазмы происходят во время магнитных бурь, что, как правило, напрямую связано

с развитием суббурь во время бури. Однако суббури во время бури обладают очень сложной структурой, и для решения проблемы возрастания давления во время бури было бы интересно детально проанализировать поведение давления плазмы до, во время и после суббури. При этом, особый интерес представляет изучение изолированных суббурь, которые возникают после длительного спокойного интервала, что позволяет проанализировать роль изменений параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП) в изменении давления плазмы внутри магнитосферы.

Проведенные исследования давления магнитосферной плазмы можно условно разделить на исследования отдельных событий [Stepanova et al., 2002; Dubyagin et al., 2003; Kozelova and Ko-

zelov, 2013] и статистические [Lui and Hamilton, 1992; Lui, 2004; Wing et al. 2013; Воробьев и др., 2018, 2019; Vorobjev et al., 2018] с одной стороны, и на исследования с использованием данных с низко- и высокоорбитальных спутников с другой. Сравнительно медленные движения высокоорбитальных спутников позволяют отследить изменения давления плазмы во время суббури только в небольшой области. Низкоорбитальный спутник пересекает авроральный овал за несколько минут, что позволяет получить профиль давления плазмы на ионосферных высотах поперек овала за временной интервал, который много меньше типичного времени развития суббури (~ часа). На широтах аврорального овала давление близко к изотропному, что позволяет его использовать при проецировании выделенной авроральной области на экваториальную плоскость [Dubyagin et al., 2003; Антонова и др., 2014; Antonova et al., 2015; Кирпичев и др., 2016] методом морфологического проецирования [Paschmann et al., 2003]. До настоящего времени практически не проводился анализ динамики распределения давления в овале при почти одновременных пересечениях овала несколькими спутниками, что дает возможность получить несколько профилей давления плазмы во время одной суббури.

Проведенные исследования показали [Wang et al., 2004; Wing et al., 2013], что давление плазмы в магнитосфере увеличивается во время суббури. Статистический анализ 163 изолированных суббурь [Воробьев и др., 2018; Vorobjev et al. 2018] показал, что интенсивность суббури (минимальное значение AL -индекса) определяется концентрацией, скоростью и динамическим давлением солнечного ветра. Абсолютная величина минимального значения AL -индекса увеличивается в среднем при увеличении этих параметров. Было показано [Кирпичев и Антонова, 2011; Wang et al., 2013], что давление плазмы внутри магнитосферы возрастает при увеличении давления солнечного ветра. Воробьев и др. [2019] провели тщательный статистический анализ давления плазмы на границах авроральных высыпаний и определили его зависимость от AL -индекса. Однако, не был проведен детальный анализ влияния динамического давления солнечного ветра на давление плазмы на авроральных широтах во время изолированной геомагнитной суббури.

Высокая корреляция между динамическим давлением солнечного ветра и максимальным давлением в магнитосфере была установлена при анализе профилей давления плазмы, полученных по данным спутника Aurore-3 [Stepanova et al., 2008] во время магнитной бури. Анализ десятков профилей давления, полученных во время геомагнитной бури 1–8 марта 1982 г., показал, что во время главной фазы бури наблюдается укручение профилей давления и смещение максимума дав-

ления к Земле. При этом максимальное значение давления коррелирует с динамическим давлением солнечного ветра. Последние исследования поведения давления плазмы во внутренней магнитосфере во время геомагнитной бури 1–5 июня 2013 г. также показали, что динамическое давление солнечного ветра и давление магнитосферной плазмы, усредненные за 6-ти часовые интервалы времени, коррелируют с коэффициентом корреляции более 0.9 [Stepanova et al., 2019].

Проведенные исследования продемонстрировали сильное влияние динамического давления солнечного ветра на давление внутри магнитосферы. Однако величина и ориентация ММП также сильно влияют на процессы во внутренней магнитосфере. При этом бывает трудно разделить вклады динамического давления солнечного ветра и ММП. Поэтому для такого выделения надо анализировать временные интервалы, когда значение ММП мало, и поле имеет северную ориентацию.

Целью данной работы является определение изменений давления плазмы на широтах аврорального овала, используя данные по пересечениям овала при разных магнитных локальных временах (MLT) четырьмя спутниками DMSP. В экваториальной плоскости основной вклад в давление плазмы вносят ионы, а вклад давления электронов в полное давление не превышает ~15% [Baumjohan et al., 1989]. Поэтому вначале можно было ограничиться анализом ионного давления. На авроральных магнитных силовых линиях могут возникать продольные падения потенциала, приводящие к ускорению авроральных электронов. Такое ускорение приводит к уменьшению концентрации ионов. Поэтому при определении давления ионов необходимо проведение коррекции, включающей анализ продольной разности потенциалов, определяемой по спектрам электронов. Анализ изменений давления включает определение его максимума и положения максимума давления на ионосферных высотах и в проекции на экваториальную плоскость.

2. ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАННОЙ МЕТОДИКИ И РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

Профили давления плазмы при пересечениях овала были получены при анализе потоков высыпавшихся ионов с использованием методик, разработанных в статьях [Stepanova et al. 2002, 2004, 2006, 2008]. Анализировались данные со спутников F13, 15, 16 и 17 DMSP (Defense Meteorological Satellite Program), имеющих почти круговые солнечно-синхронные полярные орбиты с высотой ~840 км (http://sd-www.jhuapl.edu/Aurore/data/data_step1.cgi). Давление ионов рассчитывалось с использованием данных о потоках высыпания ионов, измеренных электростатическим анализа-

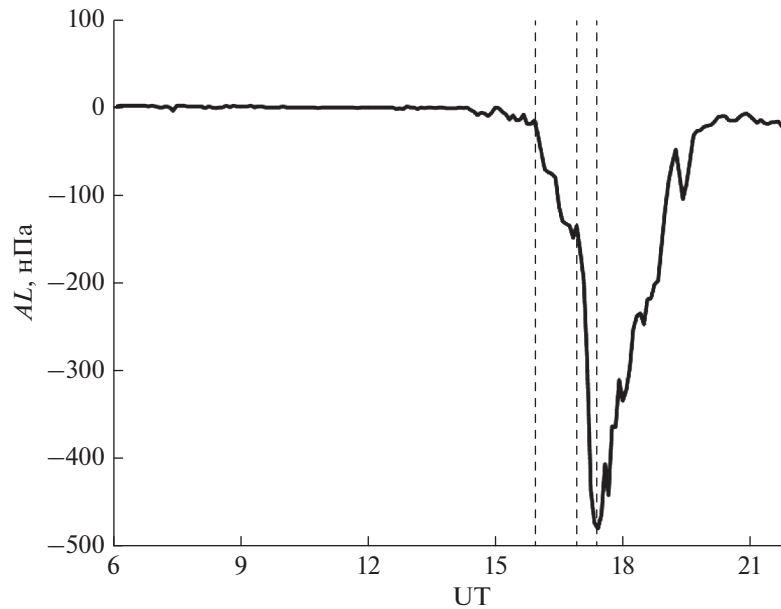


Рис. 1. Изменение 5-мин усредненного индекса AL во время геомагнитной суббури 22 декабря 2008 г. Вертикальные штриховые линии показывают временные интервалы начальной и взрывной фаз суббури.

тором SSJ/4 в диапазоне 0.139–20.4 кэВ. Данный диапазон меньше диапазонов энергий, используемых для получения давления плазмы в экваториальной плоскости, например, [Lui and Hamilton, 1992]. Wing and Newell [1998] оценили вклад частиц вне данного энергетического диапазона, используя каппа-аппроксимации для потоков ионов DMSP, и показали, что такое улучшение не приводит к значительным изменениям в оценке давления. Поэтому полученное давление в диапазоне 0.139–20.4 кэВ близко к полному ионному давлению. Принимая во внимание изотропию давления на авроральных широтах [Antonova et al. 2018], давление почти постоянно вдоль магнитной силовой линии. Методики получения значений давления в работах [Stepanova et al., 2002, 2004, 2006] были основаны на аппроксимациях высыпающихся потоков ионов максвелловскими распределениями и прямом интегрировании высыпающихся потоков. Значения давления учитывались только тогда, когда разница между обоими методами была менее 20%. Кроме того, по спектрам электронов определялась продольная разность потенциалов, и полученные значения давления ионов корректировались с учетом наблюдаемой продольной разности потенциалов.

Для анализа была выбрана изолированная геомагнитная суббуря 22 декабря 2008 года. Геомагнитная активность была очень низкой в течение более 15 ч, предшествующих выбранной суббуре (рис. 1), AL -индекс оставался близким к нулю до 15:00 UT и позже начал медленно снижаться до 16:00 UT. Кривая резко изменила наклон в 16:55 UT,

достигнув минимального значения -481 нТл в 17:25 UT. Однако программа автоматического обнаружения начала суббури, разработанная командой SuperMAG, выделила момент внезапного начала суббури (onset) в 17:11 UT. При этом использовался индекс SML (эквивалент AL -индекса), разработанный командой SuperMAG) и алгоритм, разработанный Newell and Gjerloev [2011], что, видимо, связано с трудностью определения момента внезапного начала суббури, основываясь только на наземных магнитных наблюдениях. Поэтому ниже мы будем считать, что взрывная фаза суббури началась между 16:45 и 17:11 UT. Временной интервал между 16:00 UT и этим временем будет рассматриваться как фаза зарождения суббури. Вертикальные пунктирные линии на рис. 1 показывают временные интервалы фазы зарождения и взрывной фаз суббури.

На рисунке 2 показаны скорость, плотность, динамическое давление солнечного ветра и параметры ММП, а также геомагнитные индексы AL и $SYM-H$, взятые из базы данных OMNIWeb с разрешением 5 мин (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>). Вертикальными штриховыми линиями показаны фазы суббури так же, как на рис. 1. До и во время суббури скорость солнечного ветра не превышала 350 км/с, концентрация плазмы была ~ 10 см $^{-3}$ и начала расти, начиная с 12 UT, достигнув максимального значения ~ 25 см $^{-3}$ между 16 и 17 UT. Динамическое давление солнечного ветра вело себя схожим образом, было около 2 нПа до 12 UT и достигало максимального значения 5.67 нПа вблизи 16:45 UT. V_x -компонента ММП колеба-

лась между -2 и $+2$ нТл до 15 UT, а затем стала слабо положительной и колебалась около нескольких нТл, достигнув 8 нТл в конце суббури. *V_y*-компонента ММП сохраняла почти нулевое значение до 9:30 UT, была слегка отрицательной до 16 UT, вернулась к нулевому в 16:45 и снова уменьшилась до -10 нТл между 17 и 19 UT. Далее *V_y* ММП оставалась отрицательной до конца анализируемого временного интервала. *V_z* ММП была положительной между 06 и 14 UT. В течение следующих двух часов она была близка к нулю и стала отрицательной с 16:00 UT, достигнув минимального значения -10.1 нТл в 16:55 UT. С 17:25 UT *V_z* ММП была положительной в течение получаса, достигая значения до 6 нТл. Далее *V_z* ММП была близка к нулю в течение еще одного часа, потом приняла слегка положительное значение между 19:20 и 21:20 UT, отрицательное между 21 и 22:30 UT, и снова положительное до конца анализируемого интервала. В 16:55 UT динамическое давление солнечного ветра достигло максимального значения в 6 нПа. Влияние отрицательного *V_z* ММП на развитие суббури было проанализировано во многих работах, но в большинстве случаев изменение знака *V_z* ММП с положительного на отрицательный сопровождалось увеличением динамического давления солнечного ветра. Поэтому было трудно разделить влияние этих двух факторов на динамику суббури, что могло быть причиной того, что динамическое давление солнечного ветра вначале не было включено в большинство функций связи, проанализированных Newell et al. [2007]. В рассматриваемом случае возрастание динамического давления солнечного ветра произошло за два часа до смены знака *V_z* ММП при близком к нулю значении *AL*-индекса, что позволяет выделить влияние динамического давления солнечного ветра на давление плазмы.

Эффект увеличения динамического давления солнечного ветра отчетливо виден по изменениям *SYM-H* индекса (рис. 2). Индекс *SYM-H* был положительным и увеличивался между 5:00 и 17:25 UT, достигая максимального значения в 24 нТл в 16 UT, а его вариация следует за вариацией динамического давления солнечного ветра. Сильное увеличение этого давления, начиная с 12 UT, привело, в соответствии со всеми моделями магнитопаузы, к сжатию магнитосферы и движению магнитопаузы к Земле.

Для того, чтобы понять, как динамическое давление солнечного ветра влияет на давление плазмы внутри магнитосферы, было проанализировано, как изменяется максимальное значение каждого отдельного профиля давления и его положение. На рисунке 3 показаны положения всех максимумов давления плазмы во время всех проанализированных пролетов в системе координат (MLT–GLAT). Все доступные данные были разделены на четыре группы в соответствии со зна-

чениями MLT, обозначенными кружками (02–06 MLT), ромбами (06–10 MLT), квадратами (14–18 MLT) и треугольниками (18–22 MLT). Из рисунка следует, что все зарегистрированные максимумы были локализованы на геомагнитных широтах от 65° до 75° . Орбиты спутников DMSP были сосредоточены, в основном, вблизи меридиана утро-вечер, что позволяет анализировать полученные профили давления плазмы в областях, где в экваториальной плоскости минимально сказывается изменение магнитной конфигурации токовым клином суббури.

Максимумы давления в овале часто локализованы вблизи положения границы *b_{2i}* (положения максимума потоков высыпавшихся ионов) [Newell et al., 1996]. Согласно [Newell et al., 1998], область *b_{2i}* соответствует границе изотропных ионных высыпаний. Для некоторых орбит во время пересечений аврорального овала наблюдалось более одного максимума. В этом случае был выбран максимум, расположенный максимально близко к экватору. На рисунке 4 показано динамическое давление солнечного ветра, полученное из базы данных OMNIWeb Plus (черная линия, левая шкала давлений), и полученное значение максимума давления плазмы в авроральном овале с сохранением символов рис. 3 для обозначения соответствующего MLT сектора. Из рисунка следует, что динамическое давление солнечного ветра в несколько раз превышало максимальные значения давления плазмы в овале. При этом, скорость возрастания давления в овале была близка к скорости нарастания динамического давления в солнечном ветре до начала суббури при близком к нулю *AL*-индексе, т.е. величины максимальных значений давления плазмы в исследованных секторах MLT следуют за давлением солнечного ветра до начала взрывной фазы суббури. Такое возрастание давления плазмы в овале, видимо, является следствием симметричного сжатия магнитосферной плазмы и магнитосферного магнитного поля динамическим давлением солнечного ветра, при котором возрастание градиентов давления в экваториальной плоскости компенсируется увеличением магнитного поля, и не происходит увеличения поперечных и продольных токов.

Рисунок 4 показывает также, что во время суббури развиваются процессы, приводящие к резкому возрастанию давления плазмы во всех проанализированных секторах MLT, не связанные с динамическим давлением солнечного ветра. К сожалению, небольшое число пересечений овала во время суббури не позволяет уточнить картину таких возрастных и выделить основной механизм резкого возрастания давления. Обычно считается, что таким механизмом является диполяризация магнитных силовых линий. Однако сама диполяризация может быть связана с изме-

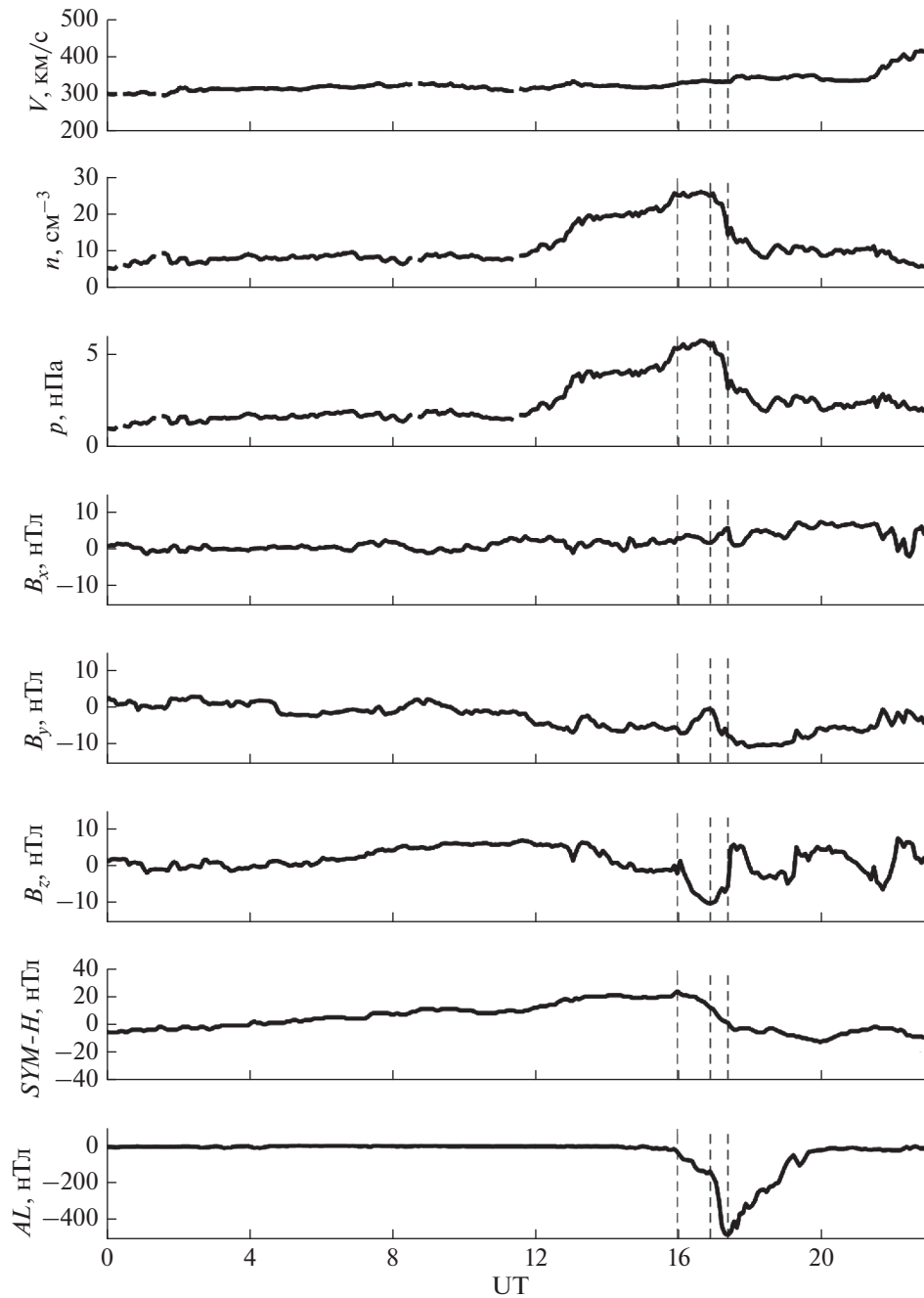


Рис. 2. Вариации основных параметров солнечного ветра, ММП и геомагнитной активности. Сверху вниз: скорость, концентрация, динамическое давление, три компоненты межпланетного магнитного поля, *SYM-H* и *AL*-индексы геомагнитной активности.

нением плазменной конфигурации при изменении давления, так как резкое увеличение потоков электронов из магнитосферы в ионосферу во время взрывной фазы суббури сопровождается увеличением потоков ускоренных ионосферных ионов из ионосферы в магнитосферу, приводящим к резкому локальному увеличению давления и изменению магнитной конфигурации. Для про-

яснения данного вопроса необходимы дальнейшие исследования.

После суббури (рис. 4) максимальные значения давления не коррелируют с динамическим давлением солнечного ветра и остаются высокими по сравнению с давлением до суббури. Отношение максимальных значений давлений после суббури к таким значениям до суббури составляет

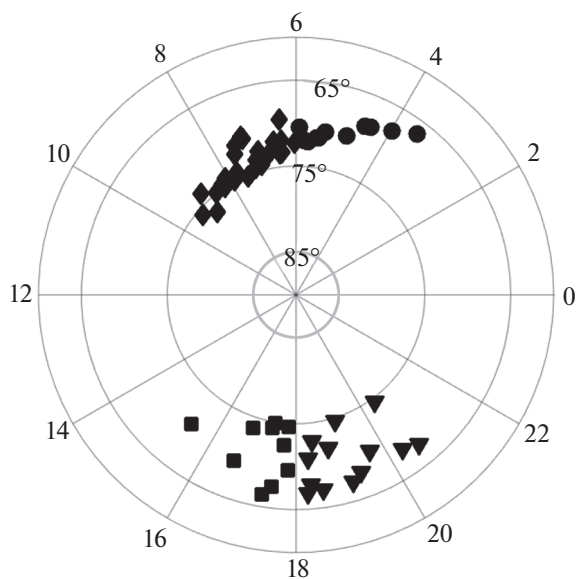


Рис. 3. Положение максимумов давления плазмы в системе координат (MLT, GLAT) в четырех секторах MLT: 2–6 MLT (●), 6–10 MLT (◆), 14–18 MLT (■) и 18–22 MLT (▼).

~2.5. Во время фазы восстановления и в течение, по крайней мере, 3 ч после суббури давление плазмы остается повышенным по сравнению со значениями, наблюдаемыми около 12 UT. При этом, динамическое давление солнечного ветра до и после суббури (рис. 2) почти совпадают (около 2 нПа). С началом суббури максимумы давле-

ния перестают следовать за динамическим давлением солнечного ветра. Необходимо отметить, что во время фазы восстановления суббури при пересечениях аврорального овала, как правило, наблюдались более чем два максимума давления.

Чтобы понять, как изменяются положения максимумов давления в экваториальной плоскости, необходимо спроецировать их на эту плоскость. Для этого на первом этапе данной работы были использованы модели IGRF (International Geomagnetic Reference Field), Tsyganenko-2001 (T01) [Tsyganenko, 2002a, b] и Tsyganenko-2004 (T04) [Tsyganenko and Sitnov, 2004]. Хорошо известно, что данные модели могут приводить к неверным результатам проецирования, см. обзор [Antonova et al., 2018]). Поэтому было также проведено морфологическое проецирование, основанное на сохранении давления плазмы вдоль магнитной силовой линии (natural mapping). С этой целью использовалась модель распределения плазмы в экваториальной плоскости ТМ [Tsyganenko and Mukai, 2003], основанная на усреднениях данных спутника Geotail.

На рисунке 5 показано, как изменяется положение максимальных значений давления плазмы до, во время и после суббури 22 декабря 2008 г. в секторе 18–22 MLT в соответствии с результатами проецирования. Как и на предыдущих рисунках, вертикальные штриховые линии ограничивают временные интервалы, соответствующие фазам суббури. На панелях, расположенных сверху вниз, приведены результаты проецирования, вы-

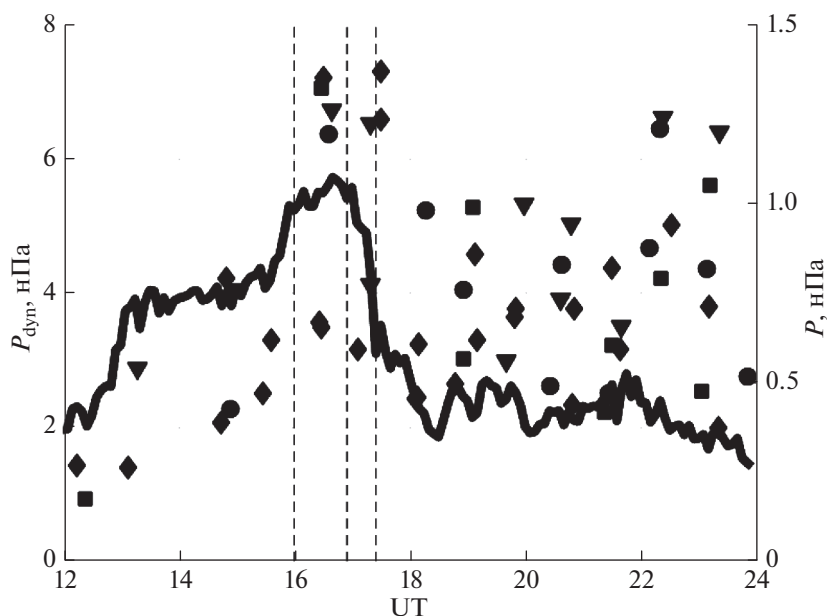


Рис. 4. Изменение динамического давления солнечного ветра, полученного из базы данных OMNI (черная линия), и максимального магнитосферного давления для каждого сектора MLT, обозначенного теми же символами, что и на рисунке 3. Вертикальные штриховые линии показывают временные интервалы фазы роста и взрывной фаз суббури.

полненного с помощью моделей TM, IGRF, T01 и T04. Анализ рисунка 5 сразу показывает, что использование моделей геомагнитного поля с предопределенной геометрией токовых систем так же как модели IGRF, близкой к дипольной (см. обсуждение в работе [Antonova et al., 2018]), приводят к нереалистично удаленному проецированию максимумов давления в хвост магнитосферы, где не наблюдаются полученные значения давления. Использование модели TM приводит к более реалистичным положениям максимумов давления, несколько превышающим реальные значения, полученные при анализе положения проекции границы b2i в экваториальной плоскости. Это может быть связано с тем, что использованные при проецировании аналитические выражения из работы [Tsyganenko and Mukai, 2003] были получены при анализе распределения давления только на геоцентрических расстояниях, превышающих $10R_E$ при $X < 0$ в GSM. Надо отметить также, что в соответствии с работой [Wang et al., 2011] усредненные значения давления, полученные на спутнике Geotail, могут до двух раз превышать значения, полученные спутниками THEMIS, что также может оказать влияние на результаты использования модели TM.

Последующее улучшение моделей магнитного поля было связано с разработкой моделей, основанных на анализе изменений магнитного поля в экваториальной плоскости для фиксированных событий [Kubyshkina et al., 1999] (event oriented model), и создание TM-моделей, не постулирующих геометрию токовых систем, начиная с работы [Tsyganenko and Sitnov, 2007]. К сожалению, для данной суббури не удалось найти необходимых данных в экваториальной плоскости для применения подхода работы [Kubyshkina et al., 1999]. Тем не менее, некоторые важные качественные выводы могут быть получены путем сравнения результатов, полученных при использовании различных моделей.

Проецирование с использованием моделей TM и IGRF показывает, что развитие суббури приводит к приближению к Земле проекций максимумов давления, что соответствует хорошо известному движению экваториальной границы аврорального овала к экватору во время суббури. В соответствии со всеми моделями, самое близкое к Земле положение максимума давления имело место в конце взрывной фазы. На фазе восстановления и после суббури положение максимумов давления почти не изменяется. Они находятся ближе к Земле, чем в период до суббури. В целом, проецирование, основанное на сохранении давления плазмы вдоль силовой линии магнитного поля, дало положения максимумов плазменного давления, которые лучше, чем проекции по магнитному полю, согласуются с определенными ранее положениями проекции экваториальной

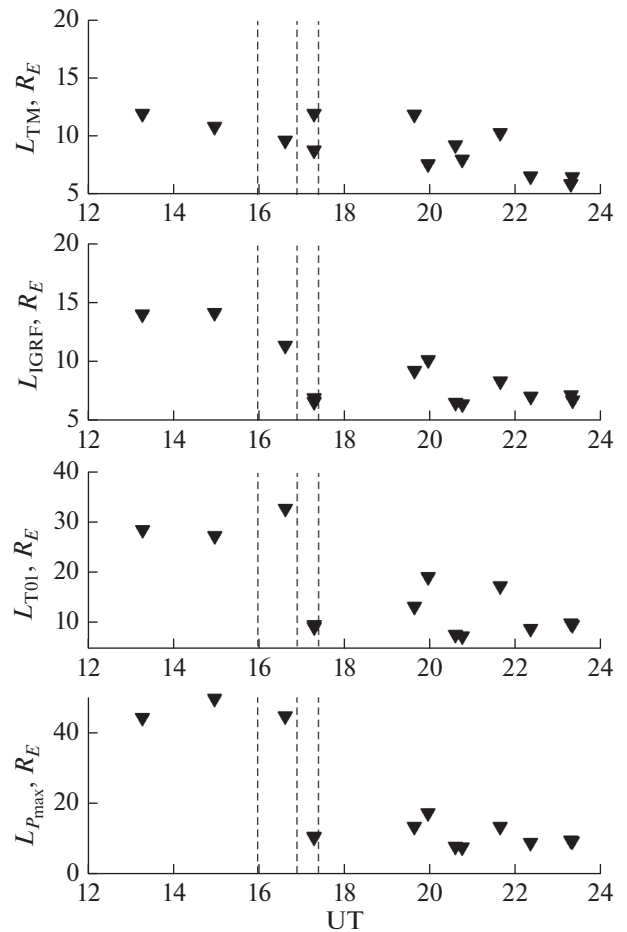


Рис. 5. Изменение положения проекции на экваториальную плоскость максимального давления до, во время и после изолированной суббури с использованием моделей геомагнитного поля TM, IGRF, T01 и T04.

границы аврорального овала [Кирпичев и др., 2016] и положениями границы изотропных высыпаний.

4. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Анализ изолированной геомагнитной суббури 22 декабря 2008 года с использованием данных со спутников серии DMSP позволил прояснить вопрос о вкладе динамического давления солнечного ветра в давление плазмы внутри магнитосферы. Показано, что изменение давления плазмы внутри магнитосферы следует за изменением динамического давления солнечного ветра для всех секторов MLT, где есть данные спутников DMSP до суббури (рис. 4). С началом суббури максимумы давления прекращают следовать за динамическим давлением солнечного ветра, и уже не удастся выделить вклад динамического давления солнечного ветра в давление плазмы. Необходимо отметить, что во время фазы восстановления суб-

бури при пересечениях аврорального овала, как правило, наблюдались более чем два максимума давления. Увеличение давления, которое сохраняется не меньше трех часов после окончания суббури, должно приводить к существенному изменению условий, приводящих к развитию следующей суббури, если новая суббуря возникнет, когда давление плазмы в магнитосфере еще не вернулось к уровню давления перед первой суббурей. При этом ослабевает зависимость давления внутри магнитосферы от динамического давления солнечного ветра, что характерно для магнитных бурь. Часто следующие суббури во время магнитной бури приводят к последовательному росту давления внутри магнитосферы и развитию кольцевого тока, магнитное поле которого существенно изменяет магнитную конфигурацию. Описанное изменение давления во время проанализированной изолированной суббури может также объяснить исключение динамического давления солнечного ветра из большинства рассматриваемых функций связи геомагнитной активности (coupling functions), зависящих от параметров солнечного ветра и ММП.

В результате, можно сформулировать следующие выводы:

– Динамическое давление солнечного ветра определяет вариации давления плазмы внутри магнитосферы при близких к нулю значениях ММП. Во время магнитных возмущений вклад динамического давления трудно выделить.

– Во время взрывной фазы суббури зафиксировано значительное возрастание максимального давления внутри овала, которое постепенно снижается на фазе восстановления суббури.

– После суббури давление плазмы на широтах овала в несколько раз превышает давление до суббури и продолжает сохраняться в течение нескольких часов, изменяя условия для развития последующей суббури.

– Проецирование максимумов давления в овал на экваториальную плоскость с использованием стандартно применяемых моделей магнитного поля приводит к положениям проекций на нерельефно больших расстояниях от Земли в хвосте магнитосферы, что подтверждает избыточную вытянутость таких моделей. Проецирование морфологическим методом, использующим постоянное давление вдоль магнитной силовой линии, приводит к положениям проекций, согласующимся с полученными ранее результатами.

5. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят коллектив разработчиков аппаратуры спутников проекта DMSP и создателей базы данных OMNI.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке гранта CONCYTEC (Convenio № N-031-218), Перу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Антонова Е.Е., Воробьев В.Г., Кирпичев И.П., Ягодкина О.И. Сравнение распределения давления плазмы в экваториальной плоскости и на малых высотах в магнитоспокойных условиях // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 54. № 3. С. 300–303. 2014.
<https://doi.org/10.7868/S001679401403002X>
- Воробьев В.Г., Ягодкина О.И., Антонова Е.Е., Зверев В.Л. Влияние скорости и плотности солнечного ветра на интенсивность изолированных магнитосферных суббурь // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 58. № 3. С. 311–323. 2018.
<https://doi.org/10.7868/S001679401803001X>
- Воробьев В.Г., Ягодкина О.И., Антонова Е.Е. Ионное давление на границах авроральных высыпаний и его связь с динамическим давлением солнечного ветра // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 59. № 5. С. 582–593. 2019.
<https://doi.org/10.1134/S0016794019050>
- Кирпичев И.П., Антонова Е.Е. Распределение давления плазмы в экваториальной плоскости магнитосферы Земли на геоцентрических расстояниях от 6 до $10R_E$ по данным международного проекта THEMIS // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 51. № 4. С. 456–461. 2011.
<https://doi.org/10.1134/S0016793211040049>
- Кирпичев И.П., Ягодкина О.И., Воробьев В.Г., Антонова Е.Е. Положение проекций экваториальной и полярной кромок ночного аврорального овала в экваториальной плоскости магнитосферы // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 56. № 4. С. 437–444. 2016.
<https://doi.org/10.7868/S0016794016040064>
- Овчинников И.Л., Антонова Е.Е. Турбулентный транспорт магнитосферы Земли: Обзор результатов наблюдений и моделирования // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 57. № 6. С. 706–714. 2017.
<https://doi.org/10.7868/S0016794017060086>
- Antonova E.E., Vorobjev V.G., Kirpichev I.P., Yagodkina O.I., Stepanova M.V. Problems with mapping the auroral oval and magnetospheric substorms // Earth, Planets and Space. V. 67. P. 166. 2015.
<https://doi.org/10.1186/s40623-015-0336-6>
- Antonova E.E., Stepanova M., Kirpichev I.P., 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>
- Baumjohann W., Paschmann G., Cattell C.A. Average plasma properties in the central plasma sheet // J. Geophys. Res. V. 94. № 6. P. 6597–6606. 1989.
<https://doi.org/10.1029/JA094iA06p06597>
- 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. P. 1282. 2003.
<https://doi.org/10.1029/2002GL016569>
- Kozelova T.V., Kozelov B.V. Substorm-associated explosive magnetic field stretching near the earthward edge of the

- plasma sheet // *J. Geophys. Res. Space Physics*. V. 118. P. 3323–3335. 2013.
<https://doi.org/10.1002/jgra.50344>
- *Kubyskhina M.V., Sergeev V.A., Pulkkinen T.I.* Hybrid input algorithm: An event-oriented magnetospheric model // *J. Geophys. Res.* V. 104. № A11. P. 24977–24993. 1999.
<https://doi.org/10.1029/1999JA900222>
- *Lui A.T.Y., Hamilton D.C.* Radial profiles of quiet time magnetospheric parameters // *J. Geophys. Res.* V. 97. № A12. P. 19325–19332. 1992.
<https://doi.org/10.1029/92JA01539>
- *Lui A.T.Y.* Potential plasma instabilities for substorm expansion onsets // *Space Sci. Rev.* V. 113. № 1. P. 127–206. 2004.
<https://doi.org/10.1023/B:SPAC.0000042942.00362.4e>
- *Newell P.T., Feldstein Y.I., Galperin Yu.I., Meng C.-I.* Morphology of nightside precipitation // *J. Geophys. Res.* V. 101. № A5. P. 10737–10778. 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 (b2i) and the ion isotropy boundary // *J. Geophys. Res.* V. 103. № A3. P. 4739–4746. 1998.
<https://doi.org/10.1029/97JA03622>
- *Newell P.T., Sotireli T., Lio, K., Meng C.-I., Rich F.J.* A nearly universal solar wind–magnetosphere coupling function inferred from 10 magnetospheric state variables // *J. Geophys. Res.* V. 112. № A01206. 2007.
<https://doi.org/10.1029/2006JA012015>
- *Newell P.T., Gjerloev J.W.* Evaluation of SuperMAG auroral electrojet indices as indicators of substorms and auroral power // *J. Geophys. Res.* V. 116. P. A12211. 2011.
<https://doi.org/10.1029/2011JA016779>
- *Paschmann G., Haaland S., Treumann R.A.* Auroral plasma physics // *Space Sci. Rev.* V. 103. P. 1–485. 2003.
<https://doi.org/10.1023/A:1023030716698>
- *Stepanova M.V., Antonova E.E., Bosqued J.M., Kovrazhkin R.A., Aibel K.R.* Asymmetry of auroral electron precipitations and its relationship to the substorm expansion phase onset // *J. Geophys. Res.* V. 107. P. 1134. 2002.
<https://doi.org/10.1029/2001JA003503>
- *Stepanova M.V., Antonov E.E., Bosqued J.M., Kovrazhkin R.A.* Radial plasma pressure gradients in the high latitude magnetosphere as sources of instabilities leading to the substorm onset // *Adv. Space Res.* V. 33. P. 761–768. 2004.
[https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(03\)00634-3](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(03)00634-3)
- *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. P. 631–1636. 2006.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2006.05.013>
- *Stepanova M., Antonova E.E., Bosqued J.M.* Radial distribution of the inner magnetosphere plasma pressure using low-altitude satellite data during geomagnetic storm: The March 1–8, 1982 event // *Adv. Space Res.* V. 41. P. 1658–1665. 2008.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.06.002>
- *Stepanova M., Antonova E.E., Moya P.S., Pinto V.A., Valdivi J.A.* Multisatellite analysis of plasma pressure in the inner magnetosphere during the 1 June 2013 geomagnetic storm // *J. Geophys. Res. Space Physics*. V. 124. P. 1187–1202. 2019.
<https://doi.org/10.1029/2018JA025965>
- *Tsyganenko N.A.* A model of the near magnetosphere with a dawn–dusk asymmetry 1. Mathematical structure // *J. Geophys. Res. Space Physics*. V. 107. № A8. 2002a.
<https://doi.org/10.1029/2001JA000219>
- *Tsyganenko N.A.* A model of the near magnetosphere with a dawn–dusk asymmetry 2. Parameterization and modeling the dynamics of the inner magnetosphere during strong geomagnetic storms // *J. Geophys. Res. Space Physics*. V. 107. № A8. 2002b.
<https://doi.org/10.1029/2001JA000220>
- *Tsyganenko N.A., Mukai T.* Tail plasma sheet models derived from Geotail particle data // *J. Geophys. Res. Space Physics*. V. 108. № A3. 2003.
<https://doi.org/10.1029/2002JA009707>
- *Tsyganenko N.A., Sitnov M.I.* Magnetospheric configurations from a high resolution data-based magnetic field model // *J. Geophys. Res. Space Physics*. V. 112. A06225.
<https://doi.org/10.1029/2007JA012260>
- *Tsyganenko N.A., Sitnov M.I.* Modeling the dynamics of the inner magnetosphere during strong geomagnetic storms // *J. Geophys. Res. Space Physics*. V. 110. № A3. 2005.
<https://doi.org/10.1029/2004JA010798>
- *Vorobjev V.G., Antonova E.E., Yagodkina O.I.* How the intensity of isolated substorms is controlled by the solar wind parameters // *Earth, Planets and Space*. V. 70. P. 148. 2018.
<https://doi.org/10.1186/s40623-018-0922-5>
- *Wang C.-P., Lyon L.R., Nagai T., Samson J. C.* Midnight radial profiles of the quiet and growth-phase plasma sheet: The Geotail observations // *J. Geophys. Res.* V. 109. P. A12201. 2004.
<https://doi.org/10.1029/2004JA010590>
- *Wang C.-P., Gkioulidou M., Lyons L.R., Wolf R.A., Angelopoulos V., Nagai T., Weygand J.M., Lui A.T.Y.* Spatial distributions of ions and electrons from the plasma sheet to the inner magnetosphere: Comparisons between THEMIS–Geotail statistical results and the Rice convection model // *J. Geophys. Res. Space Physics*. V. 116.P. A11216. 2011.
<https://doi.org/10.1029/2011JA016809>
- *Wang C.-P., Yue C., Zaharia S., Xing X., Lyons L., Angelopoulos V., Nagai V.T., Lui T.* Empirical modeling of plasma sheet pressure and three-dimensional force-balanced magnetospheric magnetic field structure: 1. Observations // *J. Geophys. Res. Space Physics*. V. 118. P. 6154–6165. 2013.
<https://doi.org/10.1002/jgra.50585>
- *Wing S., Newell P.T.* Central plasma sheet ion properties as inferred from ionospheric observations // *J. Geophys. Res.* V. 103. № A4. P. 6785–6800. 1998.
<https://doi.org/10.1029/97JA02994>
- *Wing S., Gkioulidou M., Johnson J.R., Newell P.T., Wang C.-P.* Auroral particle precipitation characterized by the substorm cycle // *J. Geophys. Res.: Space Physics*. V. 118. P. 1022–1039. 2013.
<https://doi.org/10.1002/jgra.5016>