

УДК 550.383

ПОЛОЖЕНИЕ ГРАНИЦЫ ЗАХВАТА ЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ОТНОСИТЕЛЬНО ГРАНИЦ АВРОРАЛЬНОГО ОВАЛА ВО ВРЕМЯ МАГНИТНОЙ БУРИ 19–22 ДЕКАБРЯ 2015 г. ПО ДАННЫМ СПУТНИКА МЕТЕОР-М № 2

© 2019 г. Н. В. Сотников^{1, *}, Е. Е. Антонова^{1, 2, **}, М. О. Рязанцева²,
В. О. Баринава¹, И. А. Рубинштейн¹, С. К. Мить¹

¹Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (НИИЯФ МГУ), г. Москва, Россия

²Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), г. Москва, Россия

*e-mail: sotnikov.nikita@hotmail.com

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

Поступила в редакцию 06.06.2018 г.

После доработки 06.06.2018 г.

Принята к публикации 27.09.2018 г.

Исследовано положение границы захвата электронов с энергией >100 кэВ относительно экваториальной границы аврорального овала во время большой магнитной бури 19–22 декабря 2015 г. с минимальным $Dst = -170$ нТл по данным измерений спутника Метеор-М № 2. Измерялись энергичные электроны с энергиями от 0.1 до 13 МэВ и потоки низкоэнергичных электронов с энергиями от 0.13 до 16.64 кэВ. Учтено, что пич-угловое распределение энергичных электронов вблизи границы захвата почти изотропно. Показано, что граница захвата энергичных электронов во время рассмотренной бури регистрируется внутри аврорального овала или вблизи его полярной границы. Определено расстояние по геомагнитной широте между границей захвата энергичных электронов и экваториальной границей аврорального овала. Проведен анализ зависимости данного расстояния от времени для пересечений овала до и после полуночи. Показано, что во время бури происходит уменьшение расстояния между границей захвата и экваториальной границей овала после полуночи и его увеличение до полуночи. Вблизи минимума Dst эти величины практически выравниваются. Обсуждено значение полученных результатов для описания изменений топологии магнитосферы во время магнитных бурь.

DOI: 10.1134/S0016794019020147

1. ВВЕДЕНИЕ

Положение границы захвата энергичных электронов внешнего радиационного пояса Земли содержит важную информацию о топологии магнитного поля земной магнитосферы, так как дрейфовые траектории энергичных электронов внутри области захвата замкнуты внутри магнитосферы. Определение положения границы захвата относительно аврорального овала необходимо для решения проблемы ускорения электронов внешнего радиационного пояса Земли.

Положение границы захвата определялась по данным наблюдений на низковысотных и высокопогодных спутниках в работах [Frank et al., 1964; Frank, 1971; Fritz, 1968, 1970; McDiarmid and Burrows, 1968; Vernov et al., 1969; Imhof et al., 1990, 1991, 1992, 1993; Kanekal et al., 1998; Калегаев и др., 2018; и др.]. В работе [Vernov et al., 1969] показано,

что в спокойных геомагнитных условиях граница захвата энергичных электронов локализована на геоцентрическом расстоянии $\sim 7-8 R_E$ в районе полуночи и $\sim 9 R_E$ в дневные часы. Близкие результаты по положению границы захвата были получены в работе [Imhof et al., 1993] по данным спутников CRRES и SCATHA на геоцентрических расстояниях от ~ 6 до $\sim 8.3 R_E$ (CRRES) и от ~ 7 до $\sim 8.5 R_E$ (SCATHA).

Динамика аврорального овала и внешнего электронного радиационного пояса сильно зависят от геомагнитной активности [Кузнецов и Тверская, 2007]. Авроральный овал смещается к экватору с увеличением геомагнитной активности и приобретает форму почти симметричного кольца [Newell et al., 2009]. После магнитных бурь потоки частиц пояса возрастают в 53–58% случаев, падают в 25–28% и возвращаются к предбуре-

вому уровню в 17–19% случаев [Reeves et al. 2003; Turner et al., 2013], что не удалось пока объяснить. Решение проблемы может быть связано с определением роли авроральных процессов в ускорении частиц пояса [Antonova and Stepanova, 2015].

Локализация границы захвата энергичных электронов относительно аврорального овала в течение длительного времени определялась статистически с использованием не одновременных наземных и спутниковых данных. В самом начале космических исследований в монографии [Акасофу, 1968] было проведено сопоставление границы захвата из работы [Frank et al., 1964] и границ овала из работы [Фельдштейн, 1963]. Было показано, что граница захвата электронов с энергией >40 кэВ лежит внутри аврорального овала. В то же время [Feldstein and Starkov, 1970] провели сопоставление границ аврорального овала, полученных по данным наземных измерений, и границы захвата электронов с энергией >35 кэВ, определенной по данным спутника Alouette-2, и пришли к выводу о совпадении экваториальной границы аврорального овала и границы захвата энергичных электронов. Анализ дрейфовых траекторий энергичных электронов в хвосте магнитосферы показывал, что такие траектории пересекают магнитопаузу. Поэтому вывод работы [Feldstein and Starkov, 1970] хорошо соответствовал общепринятому в течение длительного времени предположению о проецировании аврорального овала на геомагнитный хвост и долгое время не вызывал сомнений [Feldstein et al., 2014]. Сложившиеся представления могли быть пересмотрены по результатам работы [Реженов и др., 1975], в которой анализировались высыпающиеся электроны с энергиями 0.27, 11, 28 и 63 кэВ на спутнике Космос-426 и было отмечено, что граница захвата энергичных электронов может быть локализована к полюсу от границы высыпаний электронов с энергиями 11–28 кэВ. Однако, данный результат был получен на основе анализа небольшого числа измерений (21 пролет спутника в северном полушарии в течение 3 дней) и не привлек должного внимания.

Результаты, полученные за последнее время в работах [Антонова и др., 2014; Antonova et al., 2013, 2015, 2018], привели к пересмотру представлений о проецировании аврорального овала на плазменный слой. Было показано, что большая часть аврорального овала проецируется на окружающее Землю плазменное кольцо, а полярная граница овала в ночные часы в магнитоспокойных условиях на геоцентрическое расстояние $\sim 10 R_E$ [Кирпичев и др., 2016]. Данный результат потребовал проведения более внимательного анализа локализации границы захвата энергичных электронов относительно экваториальной границы

аврорального овала. Такой анализ, в отличие от проведенных ранее, потребовал одновременного наблюдения потоков высыпающихся электронов в авроральном овале и границы захвата энергичных электронов и был проведен по данным спутников Метеор-М № 1 [Riazantseva et al., 2018]. Однако в работе не рассматривалось положение границы захвата относительно границ овала во время магнитных бурь.

В настоящей работе проводится анализ положения аврорального овала и границы захвата электронов с энергией >100 кэВ по данным спутника Метеор-М № 2 во время большой магнитной бури 19–22 декабря 2015 г. с минимумом $Dst = -170$ нТл. Будет прослежена динамика положения границ овала и границы захвата во время данной бури и определено расстояние между границей захвата и экваториальной границей аврорального овала на различных фазах бури.

2. ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАННОЙ МЕТОДИКИ

Проведение одновременных измерений высыпающихся энергичных частиц и плазменных потоков в проекте Метеор дает возможность одновременно отслеживать положение аврорального овала и границы внешнего радиационного пояса. Спутник Метеор-М № 2 был запущен 8 июля 2014 г. на полярную солнечно-синхронную круговую орбиту с высотой ~ 825 км, периодом ~ 100 мин и наклоном 98.8° . В нашей работе использовались данные прибора GGAK-M, состоящего из полупроводниковых и сцинтилляционных детекторов и электростатических анализаторов. Измерялись электроны с энергиями от 0.1 до 13 МэВ и электроны плазмы с энергиями от 0.13 до 16.64 кэВ (http://smdc.sinp.msu.ru/index.py?nav=meteor_m2). Измерения электростатического анализатора позволяют отслеживать пересечения аврорального овала по методике, описанной в работе [Vorobjev et al., 2013]. Локализация границы изотропизации энергичных электронов (границы, на которой питч-угловое распределение частиц становится практически изотропным) к экватору от границы захвата [Imhof et al., 1997; Yahnin et al., 1997] позволяет использовать измерения высыпающихся энергичных электронов для определения положения границы захвата. Необходимо, однако, отметить, что детектор энергичных частиц имеет определенный порог регистрации. При этом, падение потока до уровня фона может наблюдаться к экватору от реальной границы захвата, что приводит к искажению результатов исследования при малом уровне геомагнитной активности [Riazantseva et al., 2018]. Поэтому, если поток энергичных частиц падает до уровня фона к экватору

от экваториальной границы овала, это не означает, что граница захвата локализована к экватору от овала. Но если поток падает до уровня фона к полюсу от экваториальной границы овала, это свидетельствует о локализации границы захвата внутри овала.

Одной из проблем определения положения границы захвата, особенно в ходе создания программы автоматического обнаружения, являются локальные увеличения потоков энергичных электронов на границе захвата или к полюсу от нее [Imhof et al., 1990, 1991, 1992, 1993]. Такие потоки обычно намного меньше, чем максимальные потоки высыпавших электронов на внешней границе радиационного пояса. Тем не менее, их можно наблюдать в течение нескольких часов в одном и том же месте на нескольких последовательных орбитах спутника [Myagkova et al., 2011; Antonova et al., 2011; Riazantseva et al., 2012]. Поэтому после автоматического выделения проводился визуальный анализ каждого пересечения.

Алгоритмы автоматического выделения границ включали определение уровня фона как для энергичных электронов, так и плазменных потоков. Уровень обоих фонов вычислялся для каждой отбиты отдельно. Для определения уровня фона для энергичных частиц рассчитывался средний поток в полярной шапке и его стандартное отклонение. Считалось, что измеренный поток можно классифицировать как поток электронов внешнего радиационного пояса, если разница между этим потоком и фоновым потоком была больше пяти стандартных отклонений. Далее определялось положение ближайшей к полюсу точки, где величина потока в 5 раз превышала фон. Данный жесткий критерий мог привести к сдвигу к экватору определяемой границы захвата относительно истинной границы, но давал точный ответ в тех случаях, когда граница захвата оказывалась внутри овала.

Для вычисления положения экваториальной границы аврорального овала вычислялись среднее значение и стандартное отклонение потоков энергии электронов, измеряемых плазменным анализатором при $L < 3$, где L — параметр Мак Илвайна. Далее рассматривались потоки, которые превышают фоновый поток на семь стандартных отклонений. Если полученная граница была расположена при $L > 3$ (что обычно наблюдалось во время рассмотренной бури), процедура повторялась и вычислялся средний поток и его стандартное отклонение до границы, определенной на первом шаге. Было также наложено ограничение на величину потока энергии. Она должна была превышать $0.2 \text{ эрг/см}^2 \cdot \text{с}$. Данный жесткий критерий мог привести к сдвигу границы овала к полюсу, но также как жесткий критерий по границе

захвата обеспечивал надежную идентификацию границы захвата внутри овала.

Во время магнитных бурь могут регистрироваться значительные увеличения как потоков энергичных частиц, так и плазменных потоков, что облегчает идентификацию положения границы захвата относительно аврорального овала.

3. МАГНИТНАЯ БУРЯ 19–22 ДЕКАБРЯ 2015 г.

Магнитная буря 19–22 декабря 2015 г. относится к классу больших магнитных бурь. Минимальное Dst составляло -170 нТл . На рисунке 1 показаны вариации параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП), на рисунке 2 — Dst вариация для данной бури и изменения геомагнитных индексов AE , AL в соответствии с базой данных OMNI (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/>). Буря 19–22 декабря 2015 г. может рассматриваться в качестве классического события, при котором в течение суток происходило регулярное падение Dst и последующее восстановление, не сопровождаемые значительными изменениями производной Dst . В начале бури фиксировалось возрастание плотности, скорости и динамического давления солнечного ветра. Во время главной фазы наблюдалась большая южная компонента ММП до $B_z \sim -20 \text{ нТл}$. Минимальное значение Dst было зафиксировано 20 декабря вблизи полуночи. Наблюдалась длительная фаза восстановления. В соответствии с результатами анализа, представленными в базе данных <ftp://ftp.iki.rssi.ru/pub/omni/catalog/2015> [Ермолаев и др., 2009, Yermolaev et al., 2016], исследуемая магнитная буря началась с прихода межпланетной ударной волны и области сжатия (SHEATH), за которым последовало плазменное облако с повышенным значением магнитного поля и пониженной плотностью плазмы. После прохождения облака сменилось направление ММП с южного на северное и замедлилось восстановление Dst по сравнению со сравнительно быстрым восстановлением Dst после максимума бури. Можно отметить, что весь период ММП $B_z < 0$ сопровождался интенсивными суббурами с большими значениями индексов суббуровой активности AE и AI .

4. ПОЛОЖЕНИЯ ГРАНИЦЫ ЗАХВАТА И ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ ГРАНИЦЫ ОВАЛА ВО ВРЕМЯ РАЗЛИЧНЫХ МОМЕНТОВ БУРИ

В работе проведен анализ всех пролетов спутника Метеор-М № 2 через авроральный овал во время бури и подробно рассмотрен ряд пересечений овала в различные моменты бури: во время сжатия магнитосферы за счет увеличения динамического давления солнечного ветра (19.12.2015 в 21:21–21:27), во время главной фазы (20.12.2015

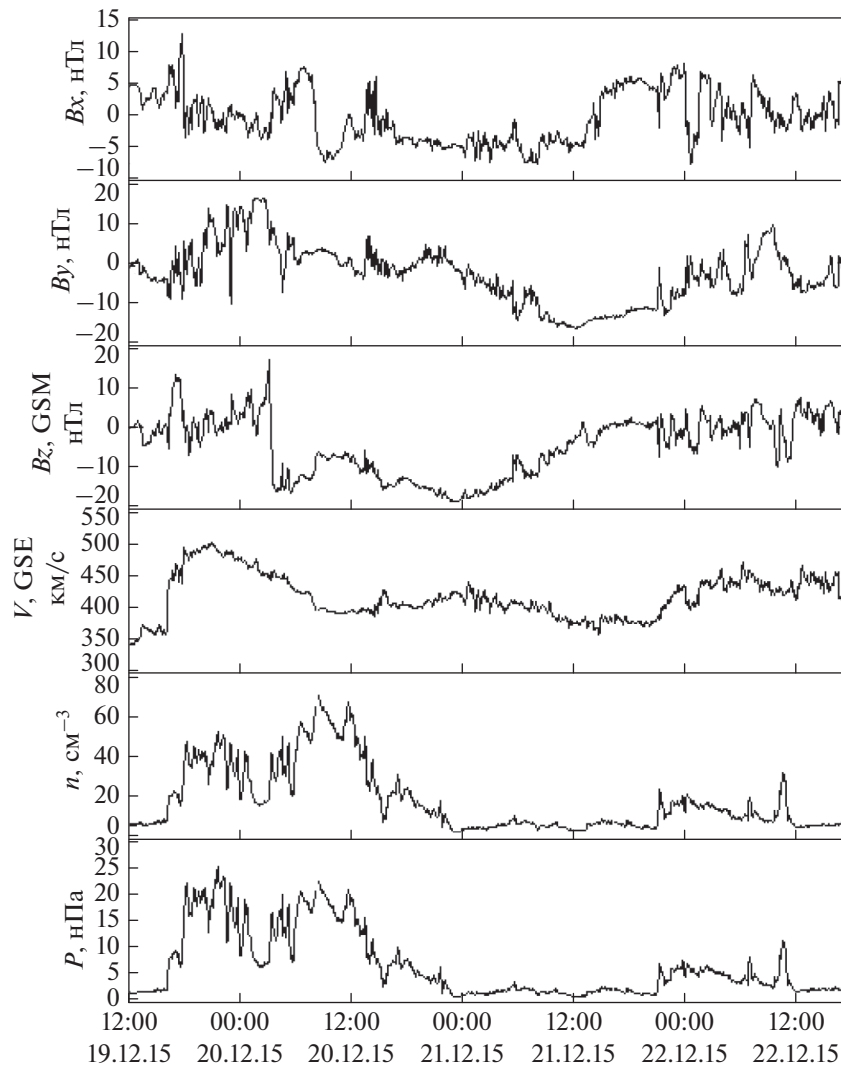


Рис. 1. Параметры межпланетного магнитного поля B_x , B_y , B_z , скорость V (км/с), плотность n (см^{-3}) и динамическое давление солнечного ветра P (нПа) по базе данных OMNI во время магнитной бури 19–21 декабря 2015 г.

в 04:11–04:41 и 16:05–16:35), максимума главной фазы (20.12.2015 в 22:47–23:17) и во время фазы восстановления (21.12.2015 в 05:33–05:03, 15:45–15:16). На рисунке 3 данные моменты (среднее время по пролету через овал и полярную шапку) показаны вертикальными пунктирными линиями.

На рисунках 4–9 представлены спектрограммы электронов в диапазоне энергий от 0.13 до 16.64 кэВ (верхняя панель). Нижняя панель показывает потоки энергии электронов плазмы (крестики) и поток электронов с энергией >100 кэВ (квадраты) для моментов пересечений овала, показанных на рис. 3. Левая шкала на нижней панели — поток энергии высыпавшихся электронов, правая шкала — поток электронов с энергией >100 кэВ. Вертикальная штриховая линия показывает границу захвата электронов с энергией >100 кэВ, штрихпунктирная — экваториальную

границу овала, определенные автоматически в соответствии с выбранными критериями. В пролете через овал во время сжатия магнитосферы солнечным ветром, показанном на рис. 4, экваториальная граница овала и граница захвата локализованы на малом расстоянии по широте и в результате выбранных жестких критериев трудно получить однозначный ответ на вопрос об относительном положении экваториальной границы овала и границы захвата. Однако, визуальный анализ показывает, что граница захвата находится внутри овала. Пролеты, показанные на рис. 5 и 6 уже позволяют сделать однозначный вывод о локализации границы захвата внутри овала во время главной фазы бури. На втором пролете во время главной фазы значительно увеличены как потоки энергичных частиц, так и потоки плазмы. Заметно значительное уширение овала и его смещение

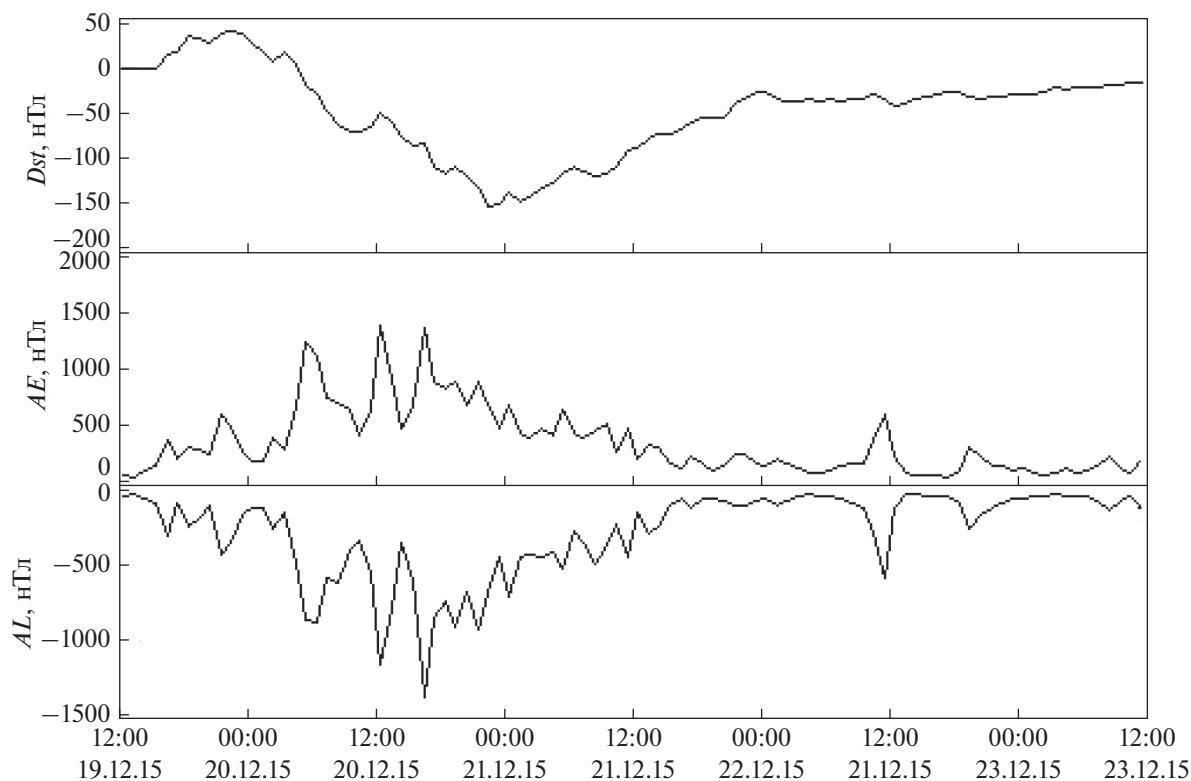


Рис. 2. Вариации индексов Dst , AE и AL во время магнитной бури 19–21 декабря 2015 г.

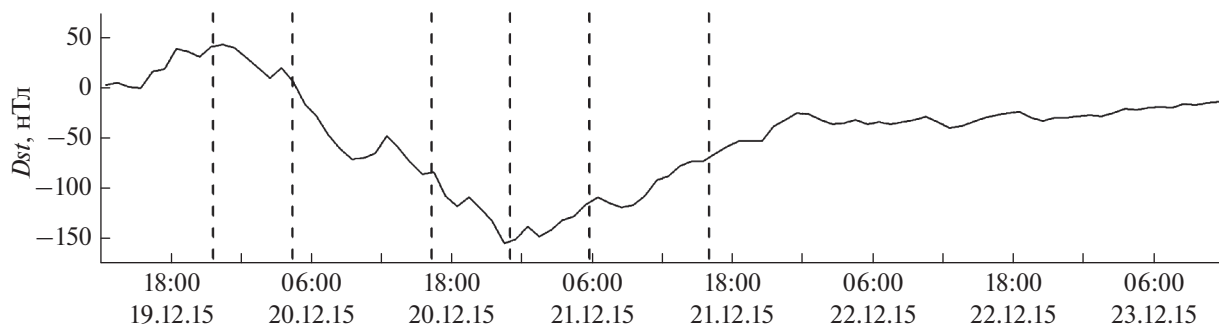


Рис. 3. Моменты пересечений аврорального овала во время бури 19–21 декабря 2015 г. (обозначены середины интервалов), отобранные для подробного анализа.

к экватору. В момент максимума главной фазы (рис. 7), граница захвата почти совпадает с полярной границей овала как при вечернем пересечении овала, так и при утреннем. В начальный период фазы восстановления (рис. 8) продолжают наблюдаться интенсивные потоки энергии электронов плазмы и широкий авроральный овал. С развитием фазы восстановления (рис. 9) падают потоки энергии электронов плазмы в овале и овал сдвигается к полюсу. При этом, возросшие во время бури максимальные потоки энергичных электронов почти не меняются, что свидетельствует о заполнении внешнего радиационного

пояса во время рассматриваемой бури, т.е. данная буря является бурей первого типа в соответствии с классификацией [Reeves et al. 2003; Turner et al., 2013]. На всех изученных представленных пролетах граница захвата была локализована внутри аврорального овала. На рисунках 6 и 9 положение границы захвата практически совпало с положением полярной границы овала. На рисунке 7 такое совпадение наблюдалось при пересечении полярной границы овала вблизи 18 ч.

На рисунке 10 показаны результаты анализа более чем 50 пересечений аврорального овала.

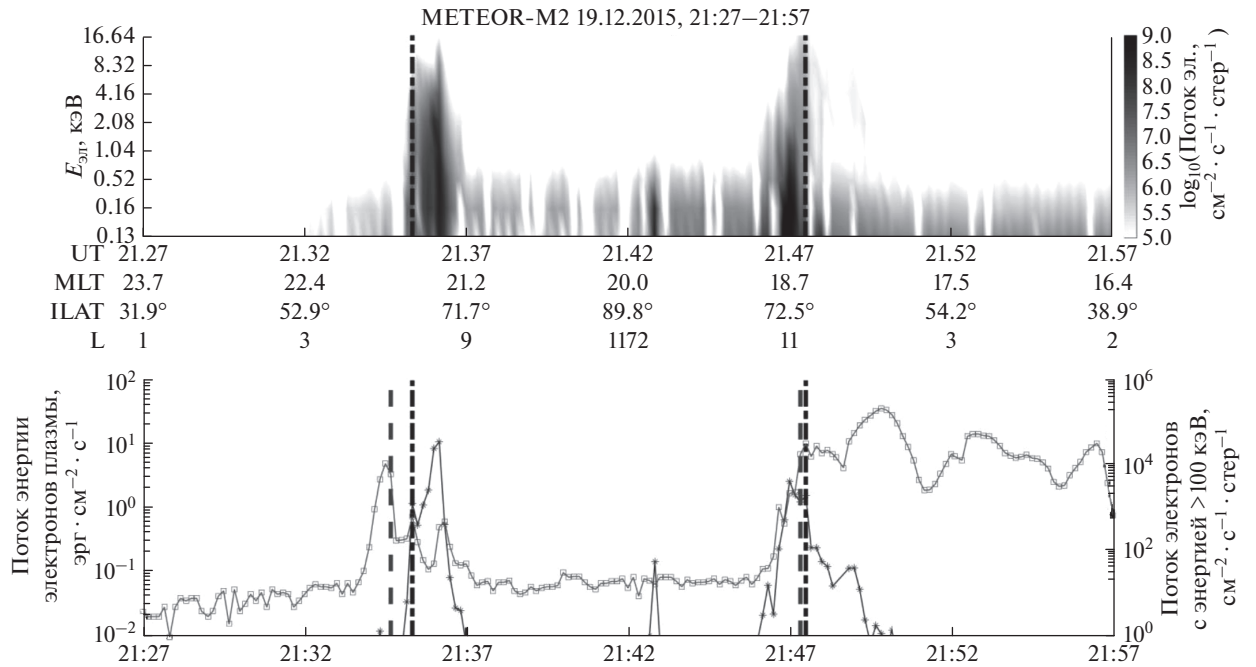


Рис. 4. Пересечение овала во время начальной фазы бури. Верхняя панель — спектрограммы электронов в диапазоне энергий от 0.13 до 16.64 кэВ. Нижняя панель — потоки энергии электронов плазмы (крестики) и поток электронов с энергией >100 кэВ (квадраты). Вертикальной штриховой линией обозначена граница захвата электронов с энергией >100 кэВ, штрих-пунктирной — экваториальная граница овала в соответствии с критерием автоматического выделения границ.

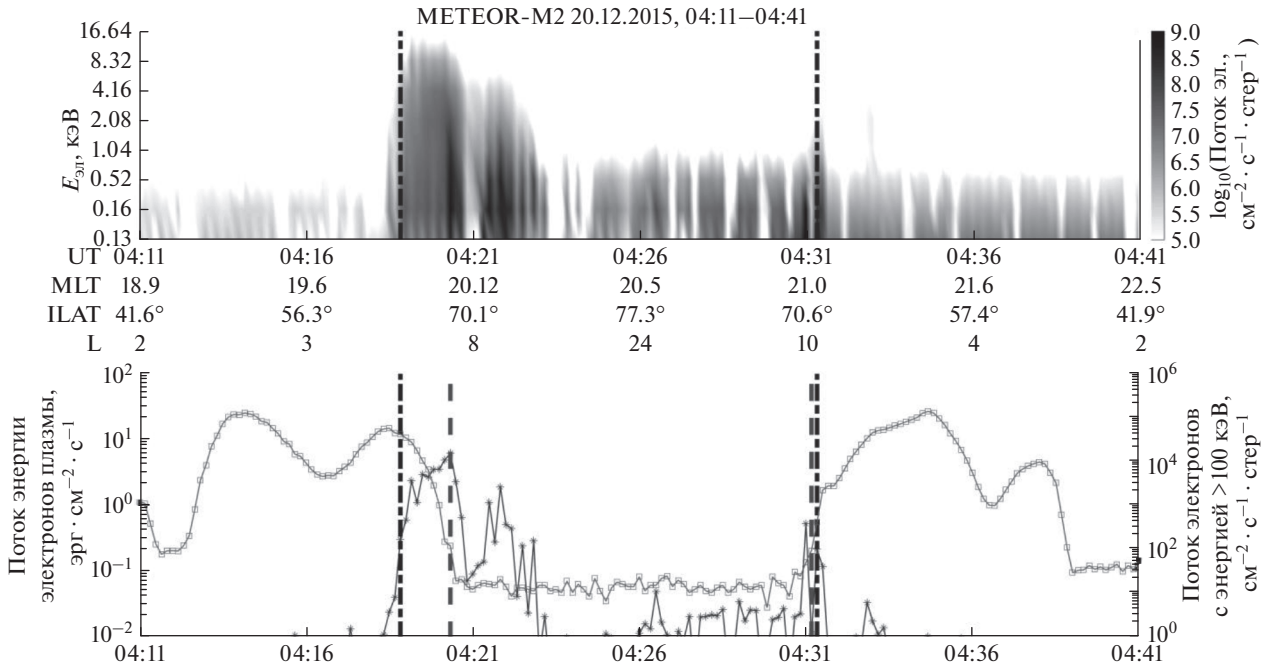


Рис. 5. Пересечение овала в начале главной фазы бури. Обозначения те же, что на рис. 4.

Для каждого пересечения в автоматическом режиме определялась разница между геомагнитными широтами границы захвата и экваториальной

границы аврорального овала $d(\text{lat})$. Положительная разница $d(\text{lat}) > 0$ означает, что граница захвата находится внутри аврорального овала, а отри-

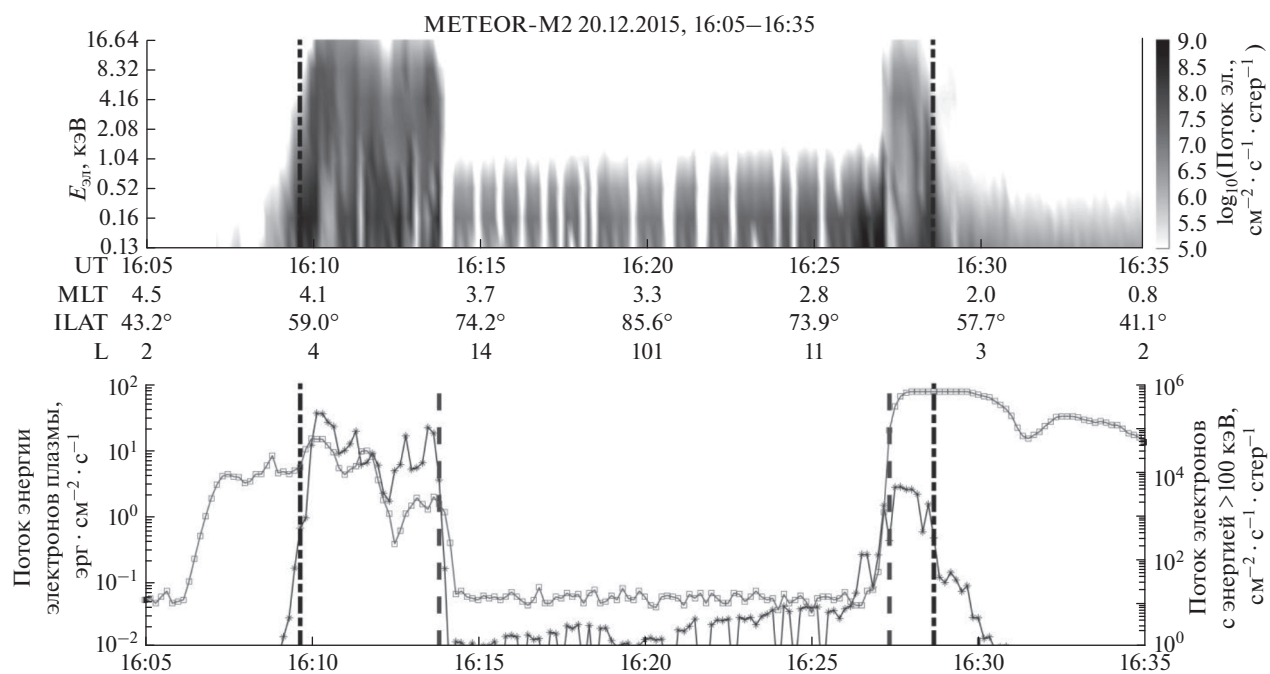


Рис. 6. Пересечение овала в середине главной фазы бури. Обозначения те же, что на рис. 4.

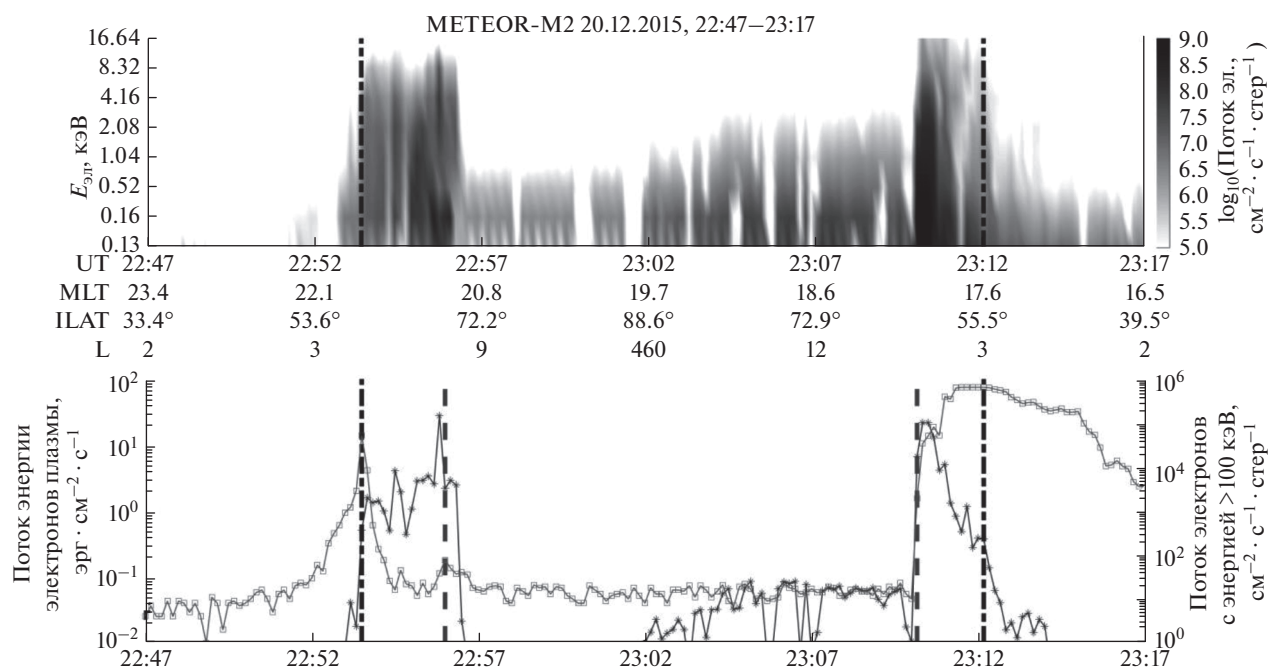


Рис. 7. Пересечение овала при минимальном Dst . Обозначения те же, что на рис. 4.

цательная $d(\text{lat}) < 0$ указывает на то, что граница захвата расположена к экватору от аврорального овала. Заметим, что спутник Метеор-М № 2 имеет солнечно-синхронную орбиту, поэтому $d(\text{lat})$ получена только для ограниченного диапазона

MLT. Квадратами показаны послеполуночные пересечения, треугольниками предполуночные. Из рисунка 10 следует, что во время бури происходит уменьшение $d(\text{lat})$ со временем после полуночи и ее увеличение до полуночи. Этот эффект

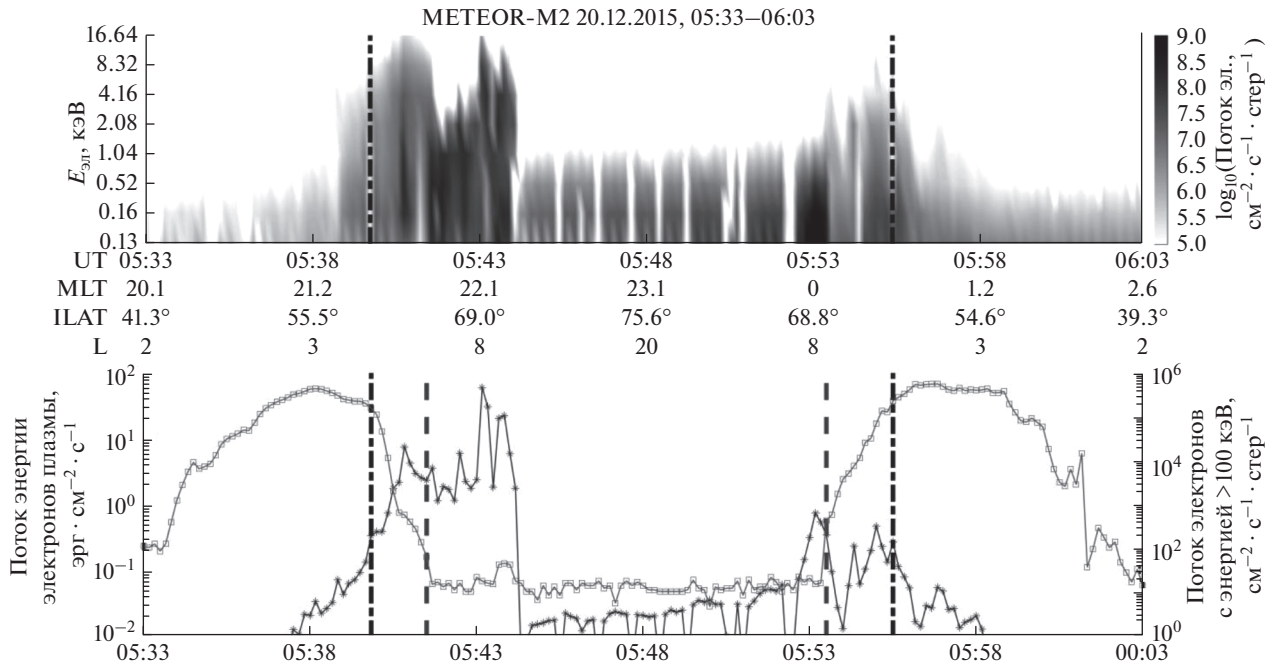


Рис. 8. Пересечение овала в начале фазы восстановления. Обозначения те же, что на рис. 4.

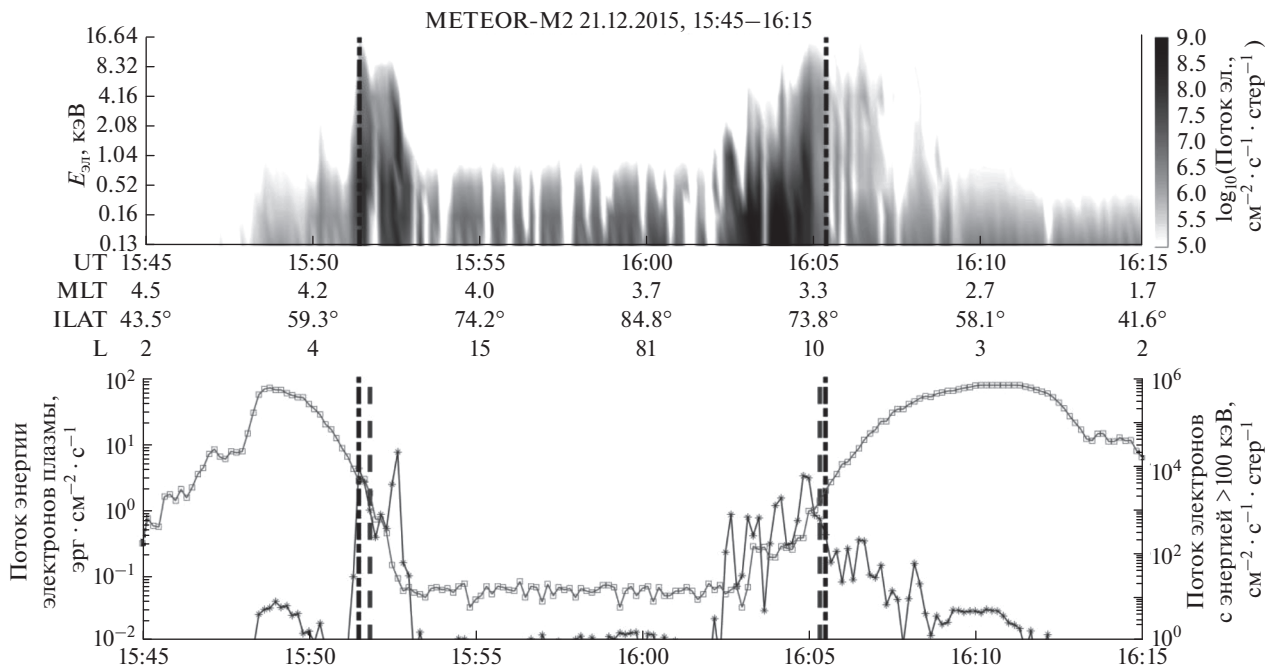


Рис. 9. Пересечение овала в середине фазы восстановления. Обозначения те же, что на рис. 4.

особенно заметен для интервала с полудня 20 декабря до полудня 21 декабря, в центре которого был зарегистрирован минимум Dst (-170 нТл). На рисунке 11 приведены величины $d(\text{lat})$ для показанных в верхней части рисунка всех пересечений

овала до и после минимума Dst . Вблизи минимума Dst величины $d(\text{lat})$ до и после полуночи практически выравниваются. Пунктирные прямые показывают зависимости $d(\text{lat})$ от времени при линейном фитировании.

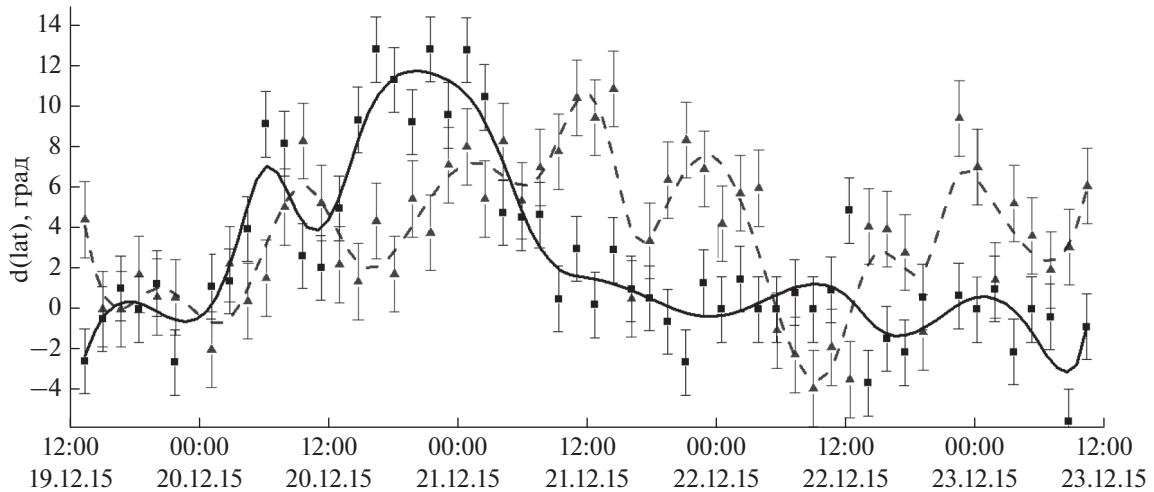


Рис. 10. Зависимость от времени расстояния по широте $d(\text{lat})$ между экваториальной границей овала и границей захвата для всех исследованных пересечений в послеполуночные (квадраты) и предполуночные (треугольники) часы.

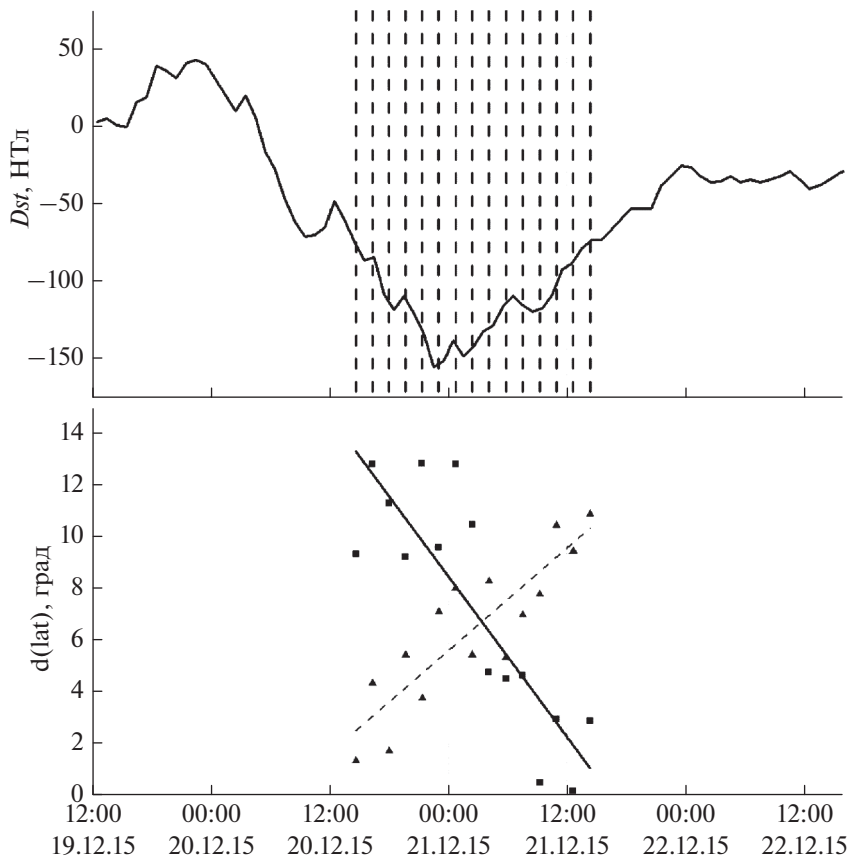


Рис. 11. Зависимость $d(\text{lat})$ от времени с полудня 20 декабря до полудня 21 декабря 2015 для показанных на верхней панели рисунка пересечений овала.

5. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Результаты одновременных наблюдений на одном и том же спутнике Метеор-М № 2 авроральных электронов и энергичных электронов с

энергией >100 кэВ во время магнитной бури 19–22 декабря 2015 г. с минимальным значением индекса $Dst = -170$ нТл позволили отследить динамику локализации границы захвата относительно

аврорального овала во время бури, что не было сделано ранее. Полученные результаты хорошо соотносятся с результатами исследования на спутнике Метеор-М № 1 в магнитоспокойных условиях [Rizantseva et al., 2018], где было показано, что граница захвата может находиться как к полюсу от экваториальной границы овала, так и к экватору от нее. При этом с увеличением уровня геомагнитной активности увеличивалась вероятность наблюдения границы захвата внутри овала.

Во время бури возросли как потоки энергичных электронов, так и потоки энергии электронов плазмы и снялись трудности, связанные с ограниченной чувствительностью прибора GGAK-M, возникающие при идентификации границ при малых потоках энергичных частиц и плазмы. Во всех исследованных пролетах через овал во время бури регистрировалось положение границы захвата внутри аврорального овала. Таким образом, настоящее исследование позволяет прояснить трудности, возникшие при сравнении положения экваториальной границы овала по наземным данным и границы захвата по спутниковым данным. Положения обеих границ сильно варьируют, что хорошо заметно на рис. 4–9 данной работы. Статистический разброс при этом достаточно велик, что привело к альтернативным выводам в работах [Akasofu, 1968] и [Feldstein and Starkov, 1970]. Ограниченная чувствительность приборов и отсутствие одновременных плазменных измерений и измерений энергичных частиц привело к задержке с решением проблемы. Кроме того, доминировала точка зрения о проецировании аврорального овала на плазменный слой, в соответствии с которой граница захвата не могла находиться внутри овала. В результате, длительное время доминировали представления о локализации границы захвата на экваториальной границе овала. Пересмотр представлений о проецировании овала на плазменный слой в работах [Антонова и др., 2014; Antonova et al., 2015, 2018; Кирпичев и др., 2016] привели к изменениям сложившихся представлений. Поэтому полученные результаты по локализации границы захвата относительно экваториальной границы овала подтверждают выводы данных работ и помогают прояснить топологию магнитосферных доменов.

Наблюдение границы захвата энергичных электронов внутри овала во время магнитной бури имеет существенное значение для прояснения механизмов формирования внешнего радиационного пояса [Antonova and Stepanova, 2015; Antonova et al., 2018]. Ускорение релятивистских электронов начинается с формирования затравочной популяции во время суббури [Baker et al., 2005]. Начало классической суббури локализовано на экваториальной границе аврорального ова-

ла [Akasofu, 1964]. При длительном процессе ускорения (время ускорения ~ длительности фазы восстановления бури) частицы должны удерживаться на замкнутых внутри магнитосферы траекториях, что обеспечивается локализацией границы захвата к полюсу от экваториальной границы овала.

В результате проведенного исследования получены следующие результаты:

- Определено положение границы захвата энергичных электронов с энергией >100 кэВ по резкому падению потоков потока до уровня фона относительно экваториальной границы аврорального овала при использовании наблюдений на спутнике Метеор-М № 2 во время магнитной бури 19–22 декабря 2015 г. с минимальным $Dst = -170$ нТл.

- Показано, что во время рассматриваемой бури граница захвата электронов внешнего радиационного пояса локализована к полюсу от экваториальной границы овала и в ряде пролетов совпадала с полярной границей овала.

- Определено расстояние по геомагнитной широте между экваториальной границей овала и границей захвата. Построена зависимость данной величины от времени для пересечений овала до и после полуночи.

- Показано, что во время бури происходит уменьшение данной величины со временем после полуночи и ее увеличение до полуночи. Вблизи минимума Dst эти величины практически выравниваются.

Необходимо отметить, что проведенное исследование носит предварительный характер и требует продолжения с анализом других магнитных бурь. Особый интерес представляет регистрация совпадений границы захвата с полярной границей овала, что может рассматриваться в качестве четкого подтверждения проецирования основной части овала на области магнитосферы, в которых дрейфовые траектории энергичных частиц замкнуты внутри магнитосферы.

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

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-05-00362.

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 аэрономия. Т. 54. № 3. С. 300–303. 2014. doi 10.7868/S001679401403002X

- Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г., Ермолаев М.Ю. Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976–2000 гг. // Космич. исслед. Т. 47. № 2. С. 99–113. 2009.
- Калегаев В.В., Баринаева В.О., Мяжкова И.Н., Еремеев В.Е., Парунакян Д.А., Неуен Д., Баринев О.Г. Эмпирическая модель высокоширотной границы внешнего радиационного пояса Земли на высотах до 1000 км // Космич. исслед. Т. 56. № 1. С. 40–46. 2018. doi 10.7868/S0023420618010053
- 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 аэрономия. Т. 56. № 4. С. 437–444. 2016. doi 10.7868/S0016794016040064
- Кузнецов С.Н., Тверская Л.В. Радиационные пояса. Глава 3.4. // Модели Космоса. Т. 1. Под редакцией М.И. Панасюка. М. Университет. 2007. С. 518–546.
- Реженев Б.В., Воробьев В.Г., Цирс В.Е., Ляцкий В.Б., Первая Т.И., Савин Б.И. Распределение вторгающихся низкоэнергичных электронов в вечерне-предполуночном секторе по данным спутника “Космос-424” // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 13. № 4. С. 521–527. 1975.
- Фельдштейн Я.И. Некоторые проблемы морфологии полярных сияний и магнитных возмущений в высоких широтах // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 3. № 2. С. 227–239. 1963.
- Akasofu S.I. The development of the auroral substorm // Planet. Space Sci. V. 12. P. 273–282. 1964. doi 10.1016/0032-0633(64)90151-5
- Akasofu S.I. Polar and magnetospheric substorms. D. Reidel publishing company, Dordrecht-Holland, 1968. (перевод: Акасофу С.-И. Полярные и магнитосферные суббури, М., Мир, 1971. 316 с.)
- Antonova E.E., Kirpichev I.P., Vovchenko V.V., Stepanova M.V., Riazantseva M.O., Pulnits M.S., Ovchinnikov I.L., Znatkova S.S. Characteristics of plasma ring, surrounding the Earth at geocentric distances $\sim 7-10R_E$, and magnetospheric current systems // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 99. № 7. P. 85–91. 2013. doi 10.1016/j.jastp.2012.08.013
- 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 Space. V. 67. 2015. doi 10.1186/s40623-015-0336-6
- Antonova E.E., Stepanova M.V. The problem of the acceleration of electrons of the outer radiation belt and magnetospheric substorms // Earth Planets Space. V. 67. 148. 2015. doi 10.1186/s40623-015-0319-7
- Antonova E.E. et al. Structure of magnetospheric current systems and mapping of high latitude magnetospheric regions to the ionosphere // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 177. P. 103–114. 2018.
- Baker D.N., Elkington S.R., Li X., Wiltberger M.J. Particle acceleration in the inner magnetosphere // The inner magnetosphere: physics and modeling. Geophysical monograph series. Eds. Pulkinen T.I., Tsyganenko N.A., Friedel R.H.W. V. 155. AGU, Washington. P. 73–85. 2005.
- Feldstein Y.I., Starkov G.V. The auroral oval and the boundary of closed field lines of geomagnetic field // Planet. Space Sci. V. 18. P. 501–508. 1970. doi 10.1016/0032-0633(70)90127-3
- Feldstein Y.I., Vorobjev V.G., Zverev V.L., Förster M. Investigations of the auroral luminosity distribution and the dynamics of discrete auroral forms in a historical retrospective // Hist. Geo Space Sci. V. 5. P. 81–134. 2014. doi 10.5194/hgss-5-81-2014
- Frank L.A., Van Allen J.A., Craven J.D. Large diurnal variation of geomagnetically trapped and precipitated electrons observed at low altitudes // J. Geophys. Res. V. 69. C. 3155–3167. 1964. doi 10.1029/JZ069i015p03155
- Frank L.A. Relationship of the plasma sheet, ring current, trapping boundary, and plasmapause near the magnetic equator and local midnight // J. Geophys. Res. V. 76. P. 2265–2274. 1971. doi 10.1029/JA076i010p02265
- Fritz T.A. High-latitude outer-zone boundary region for ≥ 40 -keV electrons during geomagnetically quiet periods // J. Geophys. Res. V. 73. P. 7245–7255. 1968. doi 10.1029/JA073i023p072457
- Fritz T.A. Study of the high-latitude, outer-zone boundary region for ≥ 40 -keV electrons with satellite Injun 3 // J. Geophys. Res. V. 75. P. 5387–5400. 1970. doi 10.1029/JA075i028p05387
- Imhof W.L., Mobilia J., Datlowe D.W., Voss H.D., Gaines E.E. Longitude and temporal variations of energetic electron precipitation near the trapping boundary // J. Geophys. Res. V. 95. P. 3829–3839. 1990. doi 10.1029/JA095iA04p03829
- Imhof W.L., Voss H.D., Mobilia J., Datlowe D.W., Gaines E.E. The precipitation of relativistic electrons near the trapping boundary // J. Geophys. Res. V. 96. P. 619–5629. 1991. doi 10.1029/90JA02343
- Imhof W.L., Voss H.D., Mobilia J., Datlowe D.W., Gaines E.E., McGlennon J.P., Inan U.S. Relativistic electron microbursts // J. Geophys. Res. V. 97. P. 13829–13837. 1992. doi 10.1029/92JA01138
- Imhof W.L., Robinson R.M., Nightingale R.W., Gaines E.E., Vondrak R.R. The outer boundary of the Earth’s electron radiation belt. Dependence upon L, energy, and equatorial pitch angle // J. Geophys. Res. V. 98. P. 5925–5934. 1993. doi 10.1029/92JA02553
- Imhof W.L., Chenette D.L., Gaines E.E., Winningham J.D. Characteristics of electrons at the trapping boundary of the radiation belt. // J. Geophys. Res. V. 102. P. 95–104. 1997. doi 10.1029/96JA02797
- Newell P.T., Liou K., Wilson G.R. Polar cap particle precipitation and aurora: review and commentary // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 71. P. 199–215. http://dx.doi.org/10.1016/j.jastp.2008.11.004. 2009.
- Kanekal S.G., Baker D.N., Blake J.B., Klecker B., Cummin, J.R., Mewaldt R.A., Mason G.M., Mazur J.E. High-latitude energetic particle boundaries and the polar cap: A statistical study // J. Geophys. Res. V. 103. P. 9367–9372. 1998. doi 10.1029/97JA03669
- McDiarmid I.B., Burrows J.R. Local time asymmetries in the high-latitude boundary of the outer radiation zone for different electron energies // Can. J. Phys. V. 46. P. 49–57. 1968. doi 10.1139/p68-007

- *Reeves G.D., McAdams K.L., Friedel R.H.W., O'Brien T.P.* Acceleration and loss of relativistic electrons during geomagnetic storms // *Geophys. Res. Lett.* V. 30. № 10. 2003. doi 10.1029/2002GL016513
- *Riazantseva M.O., Myagkova I.N., Karavaev M.V., Antonova E.E., Ovchinnikov I.L., Marjin B.V., Saveliev M.A., Feigin V.M., Stepanova M.V.* Enhanced energetic electron fluxes at the region of the auroral oval during quiet geomagnetic conditions November 2009 // *Adv. Space Res.* V. 50. P. 623–631. 2012. doi 10.1016/j.asr.2012.05.015
- *Riazantseva M.O., Antonova E.E., Stepanova M.V., Marjin B.V., Rubinshtein I.A., Barinova V.O., Sotnikov N.V.* A relation between the locations of the polar boundary of outer electron radiation belt and the equatorial boundary of the auroral oval // *Ann. Geophys.* V. 36. P. 1131–1140. 2018. doi 10.5194/angeo-36-1131-2018
- *Turner D.L., Angelopoulos V., Li W., Hartinger M.D., Usanova M., Mann I.R., Bortnik J., Shprits Y.* On the storm-time evolution of relativistic electron phase space density in Earth's outer radiation belt // *J. Geophys. Res. Space Phys.* V. 118. P. 2196–2212. 2013. doi 10.1002/jgra.50151
- *Vernov S.N., Gorchakov E.V., Kuznetsov S.N., Logachev Yu.I., Sosnovets E.N., Stolpovsky V.G.* Particle fluxes in the outer geomagnetic field // *Rev. Geophys. Space.* V. 7. P. 257–280. 1969. doi 10.1029/RG007i001p00257
- *Yahnin A.G., Sergeev V.A., Gvozdevsky B.B., Vennerström S.* Magnetospheric source region of discrete auroras inferred from their relationship with isotropy boundaries of energetic particles // *Ann. Geophys.* V. 15. P. 943–958. 1997. doi 10.1007/s00585-997-0943-z
- *Yermolaev Y.I., Nikolaeva N.S.* Catalog of large-scale solar wind phenomena during 1976–2016 // *VarSITI Newsletter.* V. 14. P. 6–7. <https://www.researchgate.net/publication/318239148>. 2017.