

УДК 550.383

СПЕКТРЫ И ПИТЧ-УГЛОВЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ ВБЛИЗИ МАКСИМУМА ВНЕШНЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ВО ВРЕМЯ МАГНИТНОЙ БУРИ 19–22 ДЕКАБРЯ 2015 г.

© 2019 г. Н. В. Сотников^{1, *}, Е. Е. Антонова^{1, 2, **}, М. О. Рязанцева²,
И. Л. Овчинников¹, И. А. Рубинштейн¹, В. О. Барина¹, 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 22.04.2019 г.

После доработки 06.05.2019 г.

Принята к публикации 23.05.2019 г.

Исследованы вариации спектров и питч-углового распределения релятивистских электронов во время большой магнитной бури 19–22 декабря 2015 г., во время которой по данным спутника Метеор-М № 2 регистрировалось положение границы захвата электронов с энергией >100 кэВ внутри аврорального овала. Используются результаты наблюдений прибора ECT-REPT в проекте RBSP/Van Allen Probes вблизи максимума вновь формирующегося пояса. Рассмотрены изменения спектров и питч-угловых распределений в результате развития отдельных суббурь во время бури. Полученные результаты свидетельствуют в пользу эффективного ускорения частиц на сравнительно коротких временных масштабах (<6 ч). Рассмотрена роль адиабатического механизма в ускорении и потерях релятивистских электронов. Получены доказательства доминирующей роли процессов на широтах аврорального овала в формировании внешнего радиационного пояса.

DOI: 10.1134/S0016794019060129

1. ВВЕДЕНИЕ

Выяснение механизмов ускорения релятивистских электронов внешнего радиационного пояса входит в число основных, до настоящего времени не решенных задач физики магнитосферы [Baker et al., 2018]. Несмотря на большое число наблюдений в ходе реализации проекта RBSP/Van Allen Probes и большое число работ по моделированию процессов ускорения релятивистских электронов, не удалось окончательно прояснить роль адиабатических и неадиабатических механизмов в процессах ускорения и потерь электронов внешнего пояса.

Подходы к решению задачи формирования внешнего радиационного пояса значительно изменились в результате исследований положения границы захвата электронов с энергией >100 кэВ относительно аврорального овала, так как по данным измерений на спутнике МЕТЕОР-М № 1 было показано, что полярная граница внешнего радиационного пояса в большинстве случаев локализована внутри аврорального овала даже в магнитоспокойное время [Riazantseva et al., 2018]. Ранее в результате статистического сопоставле-

ния положения границы захвата, определяемой по спутниковым данным, и наземных наблюдений овала считалось, что внешняя граница радиационного пояса совпадает с экваториальной границей овала. Анализ положения внешней границы радиационного пояса относительно аврорального овала во время магнитной бури 19–22 декабря 2015 г. на спутнике МЕТЕОР-М № 2 [Сотников и др., 2019] показал, что полярная граница радиационного пояса во время бури при всех пересечениях овала локализована внутри овала и в ряде пролетов совпадает с полярной границей овала, что указывает на существенную роль авроральных процессов в распаде внешнего пояса во время главной фазы бури и формировании нового пояса на фазе восстановления бури.

Авроральный овал проецируется на область минимального значения магнитного поля B на магнитной силовой линии, где имеет место значительное отклонение магнитного поля B от поля диполя, давление плазмы p превышает давление магнитного поля $B^2/2\mu_0$ (μ_0 – магнитная проницаемость вакуума) и плазменный параметр $\beta = 2\mu_0 p/B^2 > 1$ [Antonova et al., 2014, 2018a]. В рабо-

тах [Антонова и др., 2014; Кирпичев и др., 2016; Antonova et al., 2015, 2018a] было показано, что основная часть аврорального овала проецируется не на плазменный слой, а на внешнюю область кольцевого тока. Необходимым условием формирования пояса релятивистских электронов во время бури является замкнутый внутри магнитосферы характер дрейфовых траекторий большинства частиц. Дрейфовые траектории энергичных частиц в хвосте магнитосферы пересекают магнитопаузу. Поэтому, ранее суббури во время бури рассматривались только в качестве источника затравочной популяции (seed population) для ускорения электронов внешнего пояса внутри магнитосферы. Перекрывание области формирования внешнего радиационного пояса и аврорального овала указывает на необходимость учета больших вариаций магнитного поля в области формирования пояса. Необходимо также уточнить роль генерируемых во время бури суббуриевых возмущений в процессах ускорения электронов.

Во время магнитной бури при развитии кольцевого тока авроральный овал смещается на низкие широты, где, как правило, происходит резкое падение потоков релятивистских электронов во время главной фазы бури (вплоть до исчезновения внешнего радиационного пояса) и формирование нового пояса на фазе восстановления бури [Reeves, 1998]. Однако, роль авроральных процессов в наблюдаемой динамике потоков релятивистских электронов пока почти не изучена. Решение данной проблемы требует анализа динамики спектров релятивистских электронов во время бури, так как необходимо выяснить относительную роль стохастического и адиабатического механизмов ускорения. Характерной особенностью действия стохастических механизмов ускорения является увеличение жесткости спектров ускоряемых электронов. Наиболее популярен в настоящее время механизм ускорения при взаимодействии со свистовыми волнами [Summers et al., 1998; Horne and Thorn, 1998]. В свою очередь, действие адиабатического ускорения не приводит к значительным изменениям жесткости спектров. В работах [Тверской, 1997; Antonova, 2006] предполагалось, что энергичные электроны инжектируются в область ослабленного магнитного поля во время суббури и в дальнейшем ускоряются при восстановлении магнитного поля во время фазы восстановления магнитной бури. Наиболее полная информация может быть получена при анализе вариаций спектров вблизи экваториальной плоскости, так как при этом удастся проанализировать вариации питч-углового распределения релятивистских электронов. Возникающая во время бури усиленная радиальная диффузия электронов может приводить к изменениям наклонов спектров. В работе [Antonova et al., 2018b] для минимизации таких искажений

анализировались изменения спектров вблизи максимума образующегося пояса с использованием данных наблюдений в проекте RBSP/Van Allen Probes в период распада кольцевого тока и отсутствия суббури. Было показано, что уменьшение модуля Dst вариации может приводить к подъему спектра электронов с энергиями от 1.8–4.5 МэВ практически без изменения наклона спектра, что рассматривалось в качестве подтверждения действия адиабатического механизма ускорения.

Большая магнитная буря 19–22 декабря 2015 г. с минимальными $Dst = -155$ нТл и $SYM-H = -170$ нТл привела к мощному возрастанию потоков релятивистских электронов. В работе [Сотников и др., 2019] возникла опечатка и надо $Dst = -170$ нТл заменить на $Dst = -155$ нТл. Эта буря входит в базу измерений RBSP/Van Allen Probes, описанную в работе [Moya et al., 2017] и была ранее исследованная в работе [Сотников и др., 2019] по данным аврорального спутника Метеор-М № 2. На рисунке 1 на графике Dst вертикальными линиями показаны изученные в данной работе моменты пересечения аврорального овала (среднее время по пролету через овал и полярную шапку). Граница захвата электронов с энергией > 100 кэВ для данной бури была локализована внутри овала для всех пересечений овала и в ряде случаев совпадала с полярной границей овала. Для каждого пересечения в автоматическом режиме определялась разница между геомагнитными широтами границы захвата и экваториальной границы аврорального овала $d(\text{lat})$. Заметим, что спутник Метеор-М № 2 имеет солнечно-синхронную орбиту и $d(\text{lat})$ определялась только для ограниченного диапазона MLT.

Полученные доказательства пересечения аврорального овала и внешнего радиационного пояса, вплоть до совпадения полярной границ овала с полярной границей пояса, указывали на необходимость внимательного анализа динамики изменений спектров релятивистских электронов в зависимости от индексов геомагнитной активности. Поэтому на первом этапе исследований магнитная буря декабря 2015 г. была выбрана для анализа вариаций спектров и питч-углового распределения релятивистских электронов на разных фазах магнитной бури. Целью исследования является выяснение роли адиабатического механизма падения потоков релятивистских электронов во время главной фазы бури, роли суббури в ускорении релятивистских электронов и определение временного интервала, за который поток увеличивается на порядок.

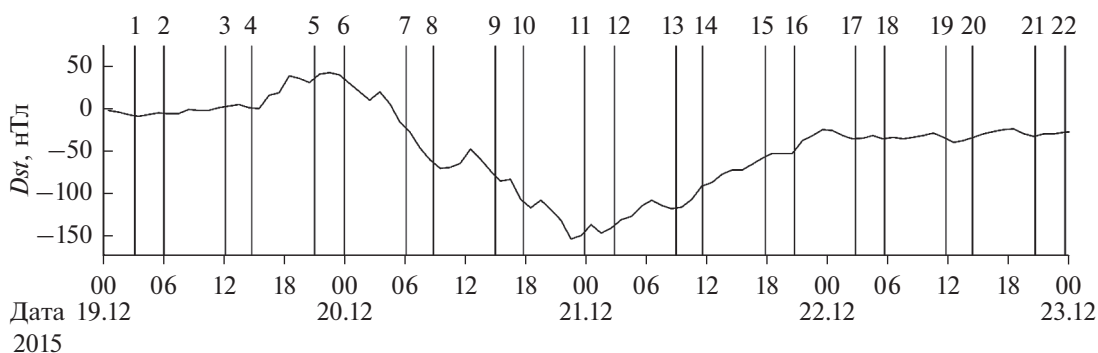


Рис. 1. Моменты пересечений аврорального овала во время бури 19–21 декабря 2015 г. (обозначены середины интервалов), на графике Dst (нТл).

2. ОСОБЕННОСТИ ПЕРИОДА НАБЛЮДЕНИЙ И ИСПОЛЬЗОВАННОЙ МЕТОДИКИ

В данной работе использованы данные спутника RBSP-A миссии Van Allen Probes, имеющего высокоапогейную эллиптическую орбиту (перигей 1.1, апогей 5.8 Re , наклонение 10°). Анализировались данные прибора ECT-REPT [Baker et al. 2013; Spence et al. 2013], с помощью которого надежно регистрировались потоки электронов с энергиями 1.8–4.5 МэВ и их питч-угловое распределение. Данные со спутника RBSP-A доступны по ссылке: (<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov>). Параметры солнечного ветра и геомагнитной активности брались из базы OMNI (<https://cdaweb.sci.gsfc.nasa.gov>) и WDC for Geomagnetism, Kyoto (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>). На рисунке 2 проведены $SYM-H$ -, AE -индексы геомагнитной активности в нТл и логарифмы всенаправленных дифференциальных потоков электронов с энергиями 1.8 и 2.1 МэВ с 17 по 23 декабря 2015 г. Соединенные линией квадраты показывают положение максимума потока на данной энергии.

Основная сложность разделения процессов изменения спектров на адиабатические и стохастические связана с усилением радиальной диффузии во время магнитной бури за счет низкочастотных геомагнитных пульсаций (в основном, в диапазоне $Pc5$). Радиальная диффузия направлена от максимума пояса на большие и меньшие геоцентрические расстояния. Из рисунка 2 следует, что максимум пояса формируется на $L \sim 4$. При этом, если до бури максимумы потоков с энергиями 1.8 и 2.1 МэВ располагались на разных геоцентрических расстояниях, то после начала фазы восстановления положения максимумов потоков практически совпадали, медленно смещаясь по направлению к Земле до $L_{\max} = 3.6\text{--}3.7$ (рис. 2). Данное значение L_{\max} хорошо соответствует закономерности, полученной Л.В. Тверской (см. обзор [Тверская, 2011]) $L_{\max} = (C_1/|Dst|_{\max})^{0.25} =$

$= (C_2/|SYM-H|_{\max})^{0.25}$, где $C_1 = 2.75 \times 10^4$ и $C_2 = 3.00 \times 10^4$, для зависимости положения максимума пояса после бури от максимальных значений $|Dst|$ и $|SYM-H|$. Поэтому в настоящей работе проводился анализ изменений формы спектра, когда орбита спутника находилась на геоцентрическом расстоянии $L \sim 4$.

Вариации параметров солнечного ветра во время бури 19–22 декабря 2015 г. анализировались в работе [Сотников и др., 2019]. Буря началась с возрастания плотности, скорости и динамического давления солнечного ветра. Во время главной фазы была велика южная компонента ММП (до $B_z \sim -20$ нТл), сопровождавшаяся интенсивными суббури. Интенсивные суббури во время главной фазы бури при AE превышающем 1300 нТл привели к инъекциям плазмы, значительному усилению кольцевого тока и большому падению $SYM-H$. В этот период наблюдалось значительное падение потоков релятивистских электронов (рис. 2).

3. ИЗМЕНЕНИЯ СПЕКТРОВ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ ВО ВРЕМЯ РАЗЛИЧНЫХ МОМЕНТОВ БУРИ

На рисунке 3 приведены все спектры релятивистских электронов (зависимости потоков релятивистских электронов J в $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{стер}^{-1} \text{МэВ}^{-1}$ от энергии E в МэВ при питч-угле 90°), измеренные прибором ECT-REPT на $L \sim 4$ для всех указанных на рис. 1 моментов. Обозначения спектров и моментов совпадают. Рассмотрим первоначально общий ход изменений спектров во время бури (рис. 4). Вертикальными линиями в верхней части рисунка на графике Dst отмечены рассматриваемые в данный момент пролеты спутника. На нижней части выделены отдельные спектры до бури (пролет 2), во время главной фазы бури (пролет 9) и во время фазы восстановления (пролеты 15, 18, 19, 20). До начала бури (пролет 2) граница захвата электронов внешнего

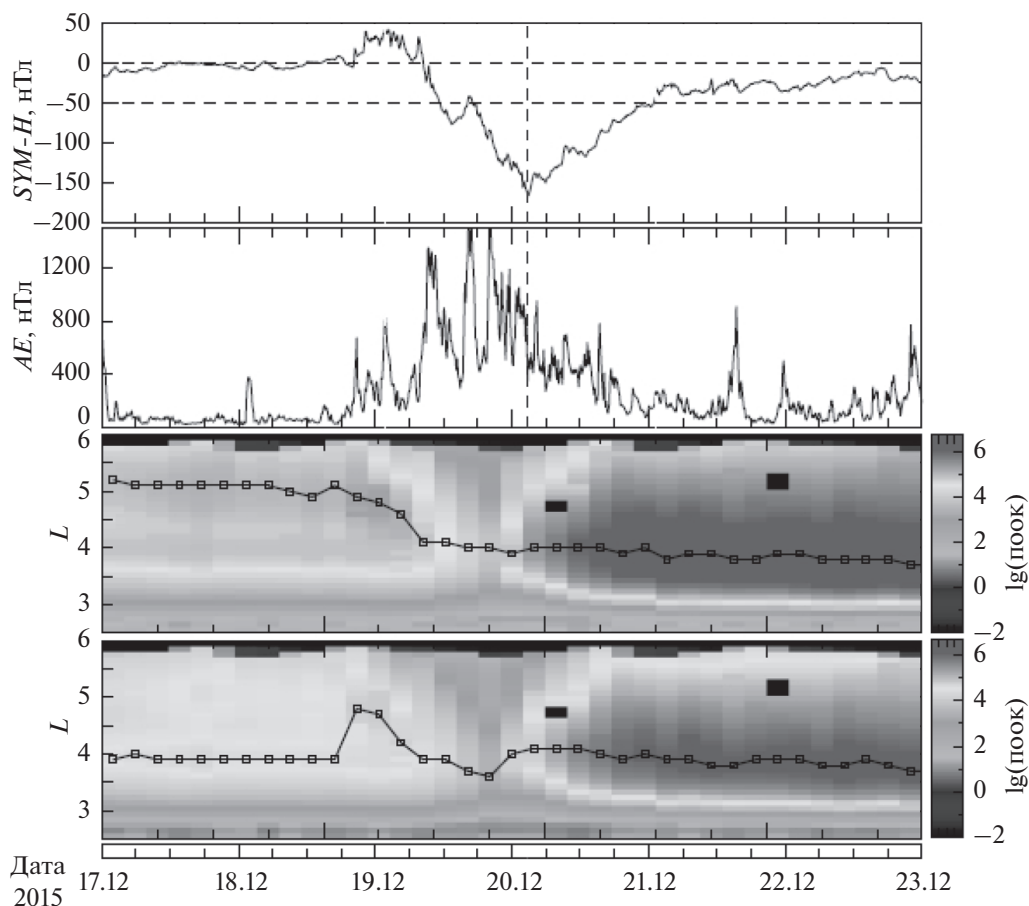


Рис. 2. Панели 1 и 2 – зависимости от времени индексов *SYM-H* и *AE* геомагнитной активности в нТл, панели 3 и 4 – логарифмы всенаправленного дифференциального потока электронов на энергиях 1.8 и 2.1 МэВ по данным прибора ECT-REPT. Соединенные прямой линией квадраты показывают положение максимума потока на данной энергии.

пояса была локализована внутри овала (по показаниям спутника Метеор-М № 2). Поток электронов с энергией в 2 МэВ составлял около $10^5 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ стер}^{-1} \text{ МэВ}^{-1}$. Для этого пролета $d(\text{lat}) = 1.91^\circ$. Сжатие магнитосферы в начале бури привело к возрастанию электронных потоков в центре пояса на $L \sim 4.5$ (рис. 2). Сравнение спектров 2 и 9 показывает, что во время главной фазы бури произошло падение на порядок величины потоков релятивистских электронов. Несмотря на падение потоков энергичных электронов во время главной фазы была зафиксирована локализация границы захвата внутри овала. В пролете 9 $d(\text{lat}) = 0.51^\circ$. При резком возрастании *Dst* во время фазы восстановления (спектр 15, $d(\text{lat}) = 2.42^\circ$) потоки увеличились на два порядка по сравнению с предбуревым уровнем и на три порядка по сравнению с главной фазой бури. В дальнейшем, при малых вариациях *Dst* (спектр 18, $d(\text{lat}) = 0.65^\circ$) потоки почти не менялись. Ниже более подробно рассмотрены изменения потоков во время главной фазы и фазы восстановления одновременно с анализом авроральных индексов.

Рисунок 5 показывает моменты пролетов во время главной фазы бури на графиках *Dst*, *AL*- и *AE*-индексов геомагнитной активности и спектры электронов во время этих пролетов (пролеты 7, 8, 9, 10). Наблюдается последовательное снижение потоков на всех энергиях при высоком уровне геомагнитной активности. Амплитуды *AE*- и *AL*-индексов достигают до 2000 нТл. Зарегистрированные падения потоков можно связать с адиабатическим эффектом [Kim and Chan, 1997; Lazutin et al., 2018]. Оно основано на анализе движения релятивистских электронов при изменениях магнитного поля во время главной фазы бури. Развитие кольцевого тока в результате суббуревых инжекций и повышения давления плазмы внутри магнитосферы приводит к уменьшению магнитного поля внутри магнитосферы (диамагнитный эффект). При сохранении третьего инварианта, равного магнитному потоку внутри дрейфовой орбиты, частицы должны смещаться на дрейфовые орбиты, находящиеся на большем чем исходное геоцентрическом расстоянии. Уменьшение поля в области вершины силовой линии при со-

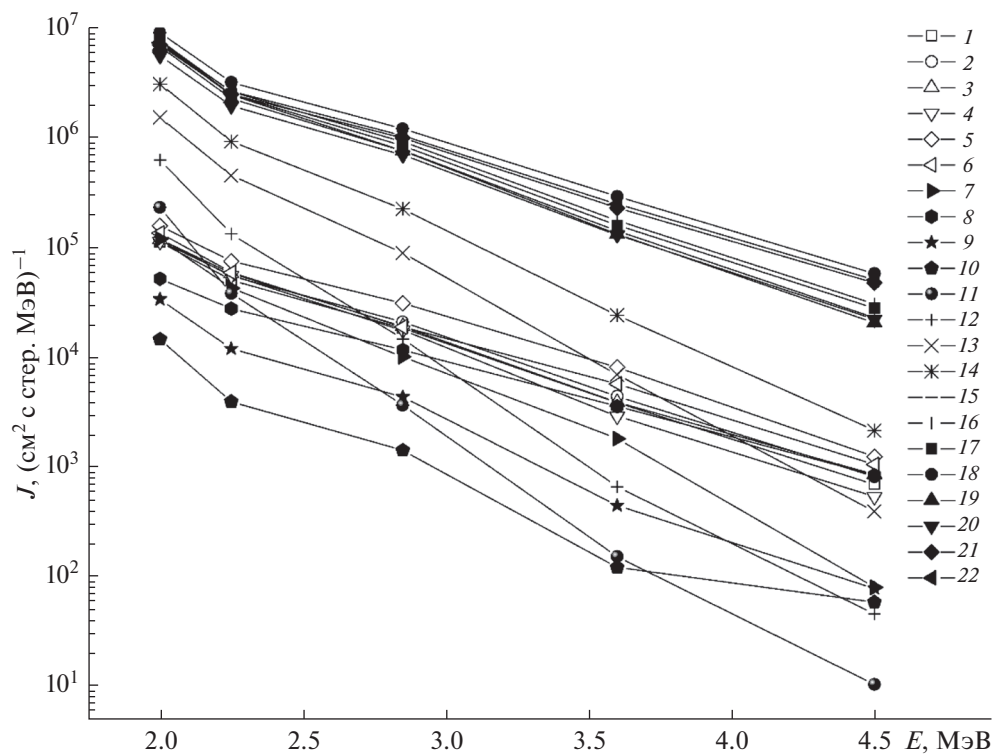


Рис. 3. Все спектры релятивистских электронов с энергиями 1.8–4.5 МэВ при питч-угле 90° (зависимость потока J в $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{стер}^{-1} \text{МэВ}^{-1}$ от энергии E в МэВ), измеренные ЕСТ-РЕРТ во время бури на $L = 4$.

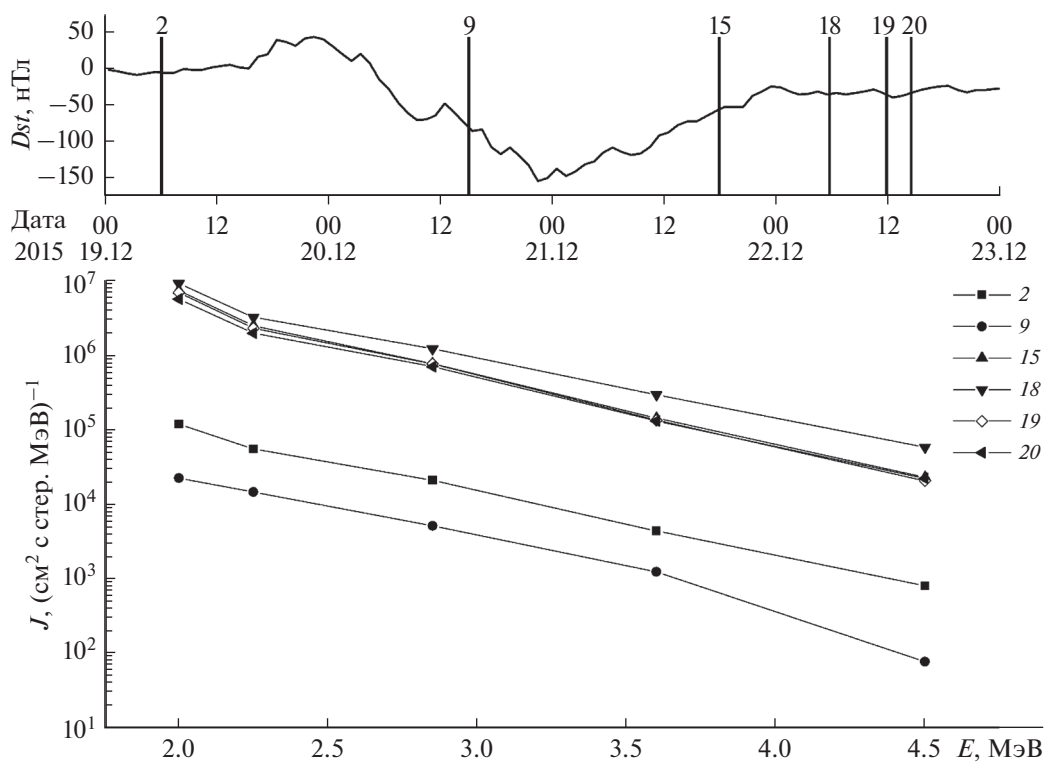


Рис. 4. Характерные изменения спектров при питч-угле 90° во время различных фаз бури.

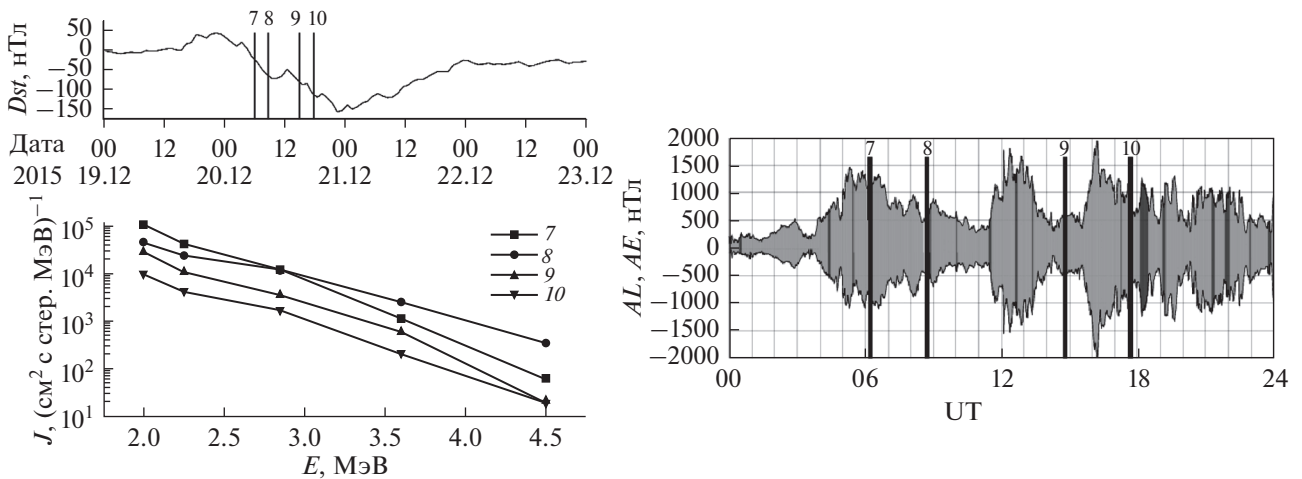


Рис. 5. Спектры при питч-угле 90° , измеренных в определенные моменты большой суббулевой активности (приведены AL и AE по данным с сайта (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>)), во время главной фазы бури. Моменты пересечений овала показаны вертикальными прямыми на графиках Dst , AL и AE .

хранении магнитного момента приводит к падению энергии частиц. Данный эффект в соответствии с [Kim and Chan, 1997] может приводить к падению потока релятивистских электронов на два порядка величины. Попадая в область квазизахвата, частицы могут пересечь магнитопаузу и выйти из магнитосферы (“затенение магнитопаузой” – magnetopause shadowing). Адиабатический эффект объясняет уменьшение потоков во время бурь, при которых происходит падение электронов внешнего пояса. Согласно Reeves et al. [2003] и Turner et al. [2013] в 53–58% магнитных бурь потоки релятивистских электронов возрастают после бури, в 17–19% случаев падают и в 25–28% почти восстанавливаются после бури (бури первого, второго и третьего типа соответственно). В работе [Antonova et al., 2018b] показано, что при бурях первого типа наблюдаются суббури во время фазы восстановления бури. Затенение магнитопаузой объясняет необратимые потери релятивистских электронов при магнитных бурях второго типа. Для объяснения восстановления потоков во время бурь третьего типа можно предположить, что возникают условия, при которых потери электронов незначительны. Такие условия могут возникать при формировании ловушек для энергичных частиц, в которых дрейфовые траектории замкнуты внутри магнитосферы, но не окружают Землю [Antonova et al., 2011; Вовченко и Антонова, 2014; Vovchenko et al., 2018]. Асимметричная часть кольцевого тока может быть такой ловушкой. Следует отметить, что падение потоков во время главной фазы бури, в настоящее время [Vaker et al., 2018], в основном, рассматривается как эффект взаимодействия с электромагнитными ионно-циклотронными волнами (EMIC waves). Однако, доказанное перекрытие области авро-

рального овала и внешнего радиационного пояса свидетельствует в пользу действия адиабатического механизма, так как овал проецируется на внешнюю область кольцевого тока с большим плазменным параметром, где велики искажения дипольного поля. Сложность количественных расчетов роли адиабатического механизма связана с нарушением третьего инварианта при усиленной радиальной диффузии под действием низкочастотных электромагнитных волн.

На рисунке 6 показаны изменения спектров электронов с энергиями 1.8–4.5 МэВ во время ранней фазы восстановления бури (пролеты 12, 13, 14, 15, и 16). Возрастания потоков энергичных электронов фиксируются как по данным МЕТЕОР-М № 2, так и по данным проекта Van Allen Probes. Суббулевая активность постоянно наблюдается во время ранней фазы восстановления, но она намного меньше, чем во время главной фазы бури. Наблюдается возрастание потоков релятивистских электронов более чем на порядок величины, что соответствует результатам работы [Antonova et al., 2018b], в соответствии с которыми суббулевая активность во время фазы восстановления является необходимым условием возрастания потоков релятивистских электронов во время бури. Обратим внимание на почти полное совпадение спектров 15 и 16 при постоянном значении Dst за период между данными измерениями. При этом, потоки возросли от спектра 14 к спектру 15 почти на порядок величин за 6 часов при изменении Dst на 40 нТл. Такие изменения трудно объяснить ускорением электронов хоровыми излучениями (интервал ускорения намного короче обычно рассматриваемого при ускорении хоровыми излучениями) и хорошо объясняются в

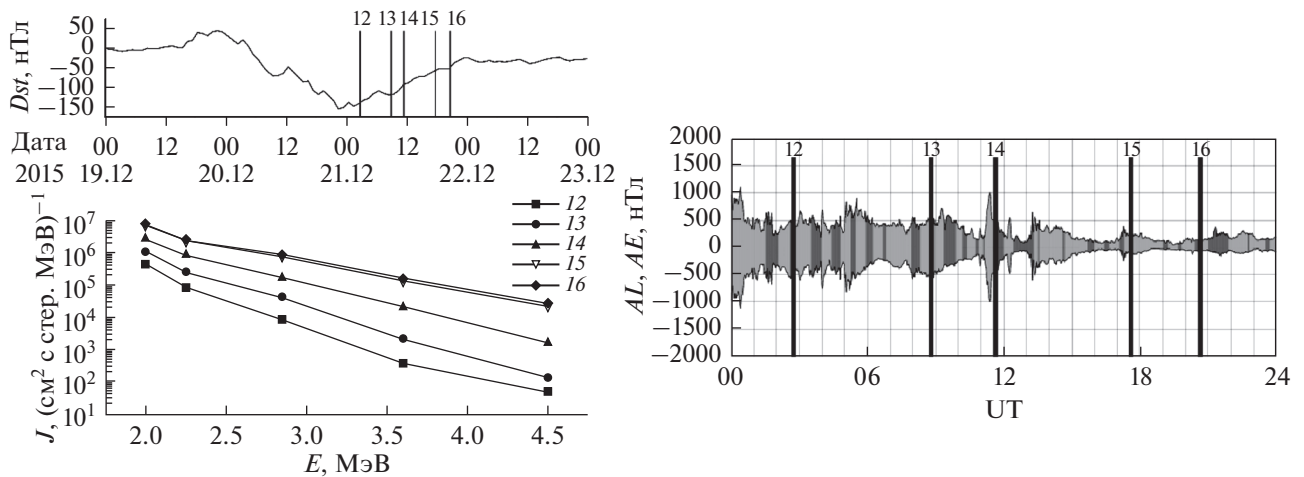


Рис. 6. Изменения спектров при питч-угле 90° во время ранней фазы восстановления. Обозначения те же, что на рис. 5.

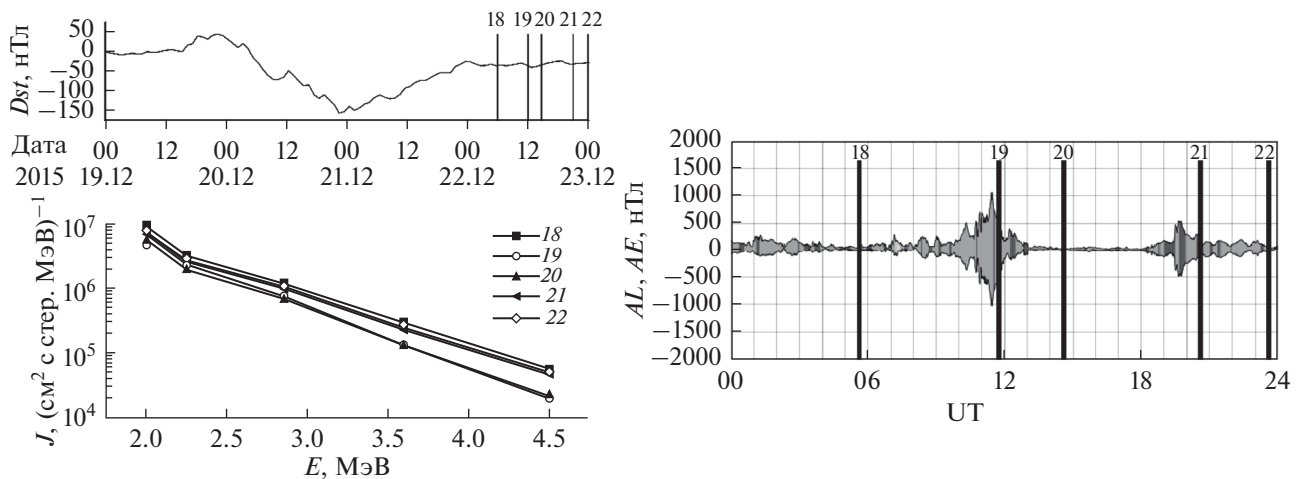


Рис. 7. Изменения спектров при питч-угле 90° в конце поздней стадии фазы восстановления во время изолированных суббурь. Обозначения те же, что на рис. 5.

рамках подхода, развитого в работах [Тверской, 1997; Antonova, 2006].

На рисунке 7 показаны изменения спектров во время поздней стадии фазы восстановления, когда индекс Dst почти не менялся, но регистрировались изолированные суббури (спектры 18, 20, 21, 22). Зафиксировано падение потоков во время первой суббури в 11 UT (от пролета 18 до 19), далее потоки оставались постоянными (от пролета 19 до 20) и увеличились после второй суббури в 21 UT (от пролета 20 до 21) с последующим сохранением спектра (от пролета 21 до 22).

Был проведен анализ изменений питч-угловых распределений электронов во время всех периодов магнитной бури, позволивший выделить характерные особенности зарегистрированных питч-угловых распределений. На рисунке 8 при-

веден пример изменений питч-угловых распределений, для всех указанных на рис. 1 моментов времени на питч-угле 90° . Анализировались также изменения на питч-углах 58° и 27° . Характерной особенностью является близость питч-угловых распределений к изотропным во время главной фазы бури и увеличение анизотропии во время фазы восстановления. Спектры 18 и 21 имеют максимумы не на питч-угле 90° , что соответствует питч-угловому распределению типа “бабочки”. Можно заметить, что объяснение вариаций питч-угловых распределений на разных фазах бури и во время суббурь требует тщательного анализа изменений магнитного поля в экваториальной плоскости, что трудно сделать при наклонении орбиты спутников в 10° .

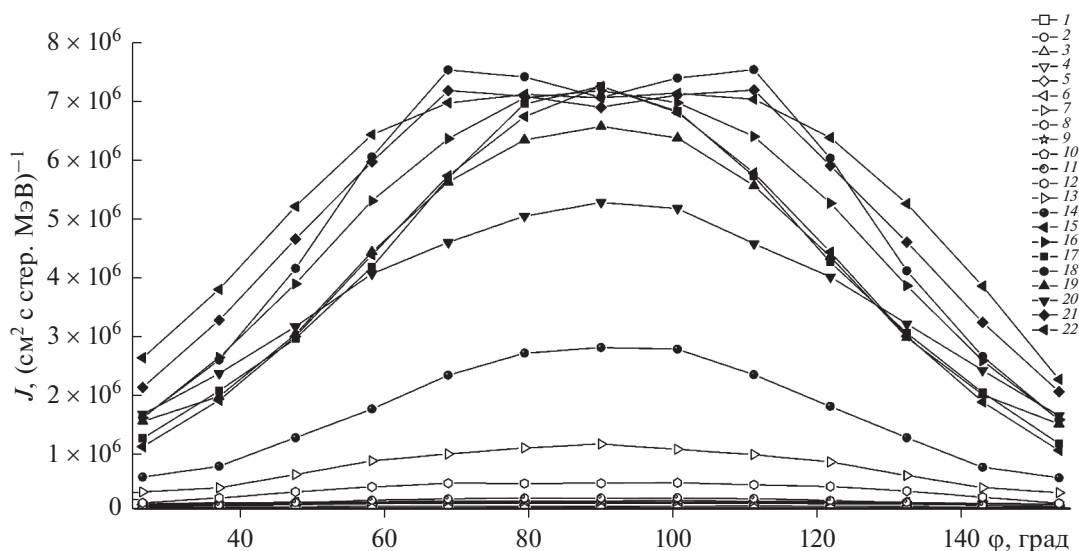


Рис. 8. Изменения питч-углового распределения электронов на энергии в 2 МэВ. Показана зависимость потока электронов J на энергии в 2 МэВ от питч-угла ϕ в градусах в моменты, приведенные на рис. 1.

4. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Проведенное исследование вариаций спектров релятивистских электронов в районе максимума внешнего радиационного пояса во время магнитной бури 19–22 декабря 2015 г. с использованием данных наблюдений проекта RBSP/Van Allen Probes и отечественного спутника МЕТЕОР-М № 2 выявило закономерности изменяющиеся подходы к анализу формирования внешнего радиационного пояса во время магнитных бурь. Прежде всего, доказанное по измерениям на МЕТЕОР-М № 2 перекрывание областей аврорального овала и внешнего радиационного пояса позволило объяснить падение потоков релятивистских электронов на главной фазе бури, в основном, за счет падения магнитного поля в экваториальной плоскости во время бури (адиабатический эффект), а не за счет высыпаний при взаимодействии волна-частица. При этом удастся также объяснить восстановление потоков после бурь третьего типа.

Различия изменений наклонов спектров при адиабатических процессах (наклон почти не меняется) и турбулентном ускорении (должна увеличиваться жесткость спектра) позволили оценить роль адиабатических и неадиабатических процессов в формировании пояса. Проведенное исследование вариаций спектров релятивистских электронов в районе максимума внешнего радиационного пояса, где должны минимально сказываться процессы радиальной диффузии, позволило проследить роль суббуревых процессов в динамике спектров релятивистских электронов. Предварительные результаты свидетельствуют в пользу эффективного ускорения частиц на сравнительно

коротких временных масштабах (<6 часов), что трудно объяснить в рамках ускорения электронов хоровыми излучениями (при наблюдаемых амплитудах волн требуется не менее суток). Подъем спектра без изменения его жесткости, наблюдаемый между суббурями, указывает на действие адиабатического механизма ускорения и подтверждает предположение работ [Тверской, 1997; Antonova, 2006]. Ранее было обнаружено теоретически предсказанное в указанных выше работах формирование резкого максимума давления плазмы в области, где после бури наблюдается максимум пояса [Antonova and Stepanova, 2015]. Таким образом, несмотря на пока ограниченное число проанализированных бурь, намечилась возможность объяснения закономерностей, на которые ранее не обращалось должного внимания.

В ходе проведенного исследования получены следующие результаты:

- Основной причиной резкого падения потоков релятивистских электронов во время главной фазы рассмотренной бури при высокой суббуревой активности является падение магнитного поля в экваториальной плоскости (адиабатический эффект).
- Изменения интенсивностей потоков электронов без заметных изменений наклонов спектров показывают, что изменение магнитного поля во время фазы восстановления эффективно ускоряет электроны, инжектированные в область пониженного поля во время суббури.
- Развитие суббурь во время фазы восстановления бури может приводить как к падению потоков электронов, так и к их возрастаниям.

• Временной масштаб резкого подъема спектра релятивистских электронов не превышает 6 ч, что требует пересмотра подходов к процессу ускорения.

Полученные результаты являются предварительными. Построенные и проанализированные спектры на различных питч-углах дали важную и интересную информацию, но анализ был пока проведен только для одной большой магнитной бури, приведшей к значительному (на два порядка величины) возрастанию релятивистских электронов. Исследование планируется продолжить с использованием данных наблюдений во время других буревых событий.

5. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят коллектив разработчиков аппаратуры спутников проектов МЕТЕОР, RBSP/Van Allen Probes и создателей базы данных OMNI.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа Сотникова Н.В., Антоновой Е.Е., Овчинникова И.Л. и Митя С.К. выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований грант № 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 аэрномия. Т. 54. № 3. С. 300–303. 2014. <https://doi.org/10.7868/S001679401403002X>
- Вовченко В.В., Антонова Е.Е. Возмущение магнитного поля диполя и генерация токовых систем асимметричным давлением плазмы // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 54. № 2. С. 176–184. 2014. <https://doi.org/10.7868/S0016794014020205>
- 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 аэрномия. Т. 56. № 4. С. 437–444. 2016. <https://doi.org/10.7868/S0016794016040064>
- Сотников Н.В., Антонова Е.Е., Рязанцева М.О., Барина В.О., Рубинштейн И.А., Мить С.К. Положение границы захвата энергичных электронов относительно границ аврорального овала во время магнитной бури 19–22 декабря 2015 г. по данным спутника МЕТЕОР-М № 2 // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 59. № 2. С. 148–159. 2019. <https://doi.org/10.1134/S0016794019020147>
- Тверская Л.В. Диагностика магнитосферы по релятивистским электронам внешнего пояса и проникновению солнечных протонов (обзор) // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 51. № 1. С. 8–24. 2011. <https://doi.org/10.1134/S0016793211010142>
- Тверской Б.А. Механизм формирования структуры кольцевого тока магнитных бурь // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 37. № 5. С. 555–559. 1997.
- Antonova E.E. Stability of the magnetospheric plasma pressure distribution and magnetospheric storms // Adv. Space Res. V. 38. P. 1626–1630. 2006. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.05.005>
- Antonova E.E., Myagkova I.M., Stepanova M.V., Riazantseva M.O., Ovchinnikov I.L., Marjin B.V., Karavaev M.V. Local particle traps in the high latitude magnetosphere and the acceleration of relativistic electrons // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 73. P. 1465–1471. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2010.11.020>
- Antonova E.E., Kirpichev I.P., Stepanova M.V. Plasma pressure distribution in the surrounding the Earth plasma ring and its role in the magnetospheric dynamics // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 115. P. 32–40. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2013.12.005>
- 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. article id. 166, 7 p. 2015a. <https://doi.org/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 and Space. V. 67. article id. 148, 8 p. 2015. <https://doi.org/10.1186/s40623-015-0319-7>
- 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. Solar-Terr. Phys. V. 177. P. 103–114. 2018a. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.10.013>
- Antonova E.E., Stepanova M.V., Moya P.S., Pinto V.A., Vovchenko V.V., Ovchinnikov I.L., Sotnikov N.V. Processes in auroral oval and outer electron radiation belt // Earth, Planets and Space. V. 70. article id. 127, 11 p. 2018b. <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0898-1>
- 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.
- Baker D.N., Elkington S.R., Erickson P.J., Fennell J.F., Foster J.C., Jaynes A.N., Verronen P.T. Space weather effects in the Earth's radiation belts // Space Sci. Rev. V. 214. Issue 1. article id. 17, 60 p. 2018. <https://doi.org/10.1007/s11214-017-0452-7>
- Baker D.N., Kanekal S.G., Hoxie V.C., et al. The relativistic electron-proton telescope (REPT) instrument on board the radiation belt storm probes (RBSP) spacecraft: characterization of Earth's radiation belt high-energy particle populations // Space Sci. Rev. V. 179. Issue 1–4. P. 337–381. 2013. <https://doi.org/10.1007/s11214-012-9950-9>
- Horne R.B., Thorne R.M. Potential waves for relativistic electron scattering and stochastic acceleration during magnetic storms // Geophys. Res. Lett. V. 15. P. 3011–3014. 1998. <https://doi.org/10.1029/98GL01002>
- Kim H-J, Chan A.A. Fully adiabatic changes in storm time relativistic electron fluxes // J. Geophys. Res. V. 102.

- № A10. P. 22107–22116. 1997.
<https://doi.org/10.1029/97JA018>
- *Lazutin L.L., Dmitriev A.V., Suvorova A.V.* Electron radiation belt dynamics during magnetic storms and quiet time // *Solar-Terrestrial Physics*. V. 4. Iss. 1. P. 51–60.
<https://doi.org/10.12737/stp-41201805>
- *Moya P.S., Pinto V.A., Sibeck D.G., Kanekal S.G., Baker D.N.* On the effect of geomagnetic storms on relativistic electrons in the outer radiation belt: Van Allen Probes observations // *J. Geophys. Res.* V. 122. 2017.
<https://doi.org/10.1002/2017JA024735>
- *Reeves G. D.*, Relativistic electrons and magnetic storms: 1992–1995 // *Geophys. Res. Lett.* V. 25. P. 1817–1820. 1998.
<https://doi.org/10.1029/98GL01398>
- *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.
<https://doi.org/10.1029/2002GL016513>
- *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.
<https://doi.org/10.5194/angeo-2018-6>
- *Spence H.E., Reeves G.D., Baker D.N. et al.* Science goals and overview of the radiation belt storm probes (RBSP) energetic particle, composition, and thermal plasma (ECT) suite on NASA's Van Allen Probes mission // *Space Sci. Rev.* V. 179. P. 311–336. 2013.
<https://doi.org/10.1007/s11214-013-0007-5>
- *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.* V. 118. P. 2196–2212. 2013.
<https://doi.org/10.1002/jgra.50151>
- *Summers D., Thorne R.M., Xiao F.* Relativistic theory of wave–particle resonant diffusion with application to electron acceleration in the magnetosphere // *J. Geophys. Res.* V. 103. Issue A9. P. 20487–20500. 1998.
- *Vovchenko V.V., Antonova E.E., Stepanova M.* Magnetic holes observed in the ring current region near the equatorial plane // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 177. P. 141–147. 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.08.024>