

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени М.В.ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Сотников Никита Вадимович

**ГРАНИЦА ЗАХВАТА ЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ВО ВРЕМЯ
МАГНИТНЫХ БУРЬ И РОЛЬ АДИАБАТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
В ФОРМИРОВАНИИ ВНЕШНЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА**

Специальность 01.03.03 – физика Солнца

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва, 2022

Работа выполнена в отделе космических наук Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Научный руководитель: **Антонова Елизавета Евгеньевна**
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Пилипенко Вячеслав Анатольевич**
доктор физико-математических наук, профессор,
ФГБУН Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
главный научный сотрудник, заведующий лабораторией
физики околоземного пространства (402)

Нусинов Анатолий Абрамович
доктор физико-математических наук, старший научный
сотрудник,
ФГБУ Институт прикладной геофизики им. Е.К. Федорова
Федеральной службы по гидрометеорологии и
мониторингу окружающей среды (Росгидромет),
заведующий лабораторией солнечно-земных связей

Криволицкий Алексей Александрович
доктор физико-математических наук,
ФГБУ Центральная аэрологическая обсерватория (ЦАО),
заведующий лабораторией химии и динамики атмосферы
(ЛХДА)

Защита состоится «22» июня 2022 г. в 17 часов на заседании диссертационного совета МГУ.01.05 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 5 (19-й корпус Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М. В. Ломоносова), аудитория 2-15.

E-mail: nav19iv@gmail.com

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/dissertations/454570247/>

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета МГУ.01.05,
кандидат физико-математических наук

Н. А. Власова

Общая характеристика работы

Актуальность избранной темы и степень ее разработанности

Одной из основных задач программ космической погоды является выяснение процессов, приводящих к возрастаниям на несколько порядков величины потоков релятивистских электронов внешнего радиационного пояса, а также к сбоям в работе и выходу из строя спутников и космических аппаратов. Исследования в данном направлении ведутся с момента открытия внешнего радиационного пояса, но пока далеки от своего завершения, что обуславливает актуальность работы.

Цели и задачи исследования

Целью работы является определение закономерностей формирования внешнего радиационного пояса магнитосферы Земли во время магнитных бурь. Для достижения этой цели решались задачи определения положения границы захвата энергичных электронов относительно аврорального овала во время бурь с использованием данных наблюдений отечественного проекта METEOR и изменений наклонов спектров и интенсивности потоков релятивистских электронов вблизи максимума формирующегося нового пояса с использованием находящихся в открытом доступе данных других спутниковых наблюдений.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования являются базы данных наблюдений отечественного низкоорбитального проекта METEOR и высокоапогейной миссии RBSP/Van Allen probes.

Предметом исследования являются результаты одновременных измерений потоков частиц малых энергий в проекте METEOR (плазмы) и энергичных электронов внешнего радиационного пояса во время пересечений аврорального овала, результаты измерений потоков релятивистских электронов на RBSP/Van Allen probes.

Научная новизна работы

Научная новизна состоит в определении закономерностей, изменяющих ранее развитые подходы в области динамики внешнего пояса. Перекрывание внешней части аврорального овала и внешнего радиационного пояса во время бури свидетельствует о недооценке роли авроральных процессов во время бури. Обнаруженные в ходе исследования совпадения полярной границы радиационного пояса с полярной границей овала исключают универсальный характер принятой в предыдущих исследованиях картины, в соответствии с которой радиационный пояс формируется к экватору от овала, а весь овал проецируется на плазменный слой. При анализе изменений наклонов спектров релятивистских электронов во время бури получены доказательства действия

адиабатического механизма, приводящего к падению потоков электронов во время главной фазы бури и их возрастанию во время фазы восстановления.

Теоретическая и практическая значимость работы

Результаты работы имеют существенное значение для физики внешнего радиационного пояса и важны для разработки программ предсказания появления повышенных потоков релятивистских электронов в магнитосфере Земли.

Методология диссертационного исследования

Методология основана на анализе данных отечественных и зарубежных спутниковых наблюдений с использованием подтвержденных теоретических подходов. В ходе исследования был проведен анализ результатов измерений на отечественном низкоорбитальном спутнике МЕТЕОР-М № 2. Отобраны периоды сравнительно больших магнитных бурь с минимальным значением Dst индекса порядка и менее -100 нТл, для которых имелись одновременные со спутником МЕТЕОР-М № 2 измерения на спутниках миссии RBSP/Van Allen probes вблизи экваториальной плоскости. Для отобранных периодов на спутнике МЕТЕОР-М № 2 проводились надежные измерения потоков электронов внешнего пояса с энергией > 100 кэВ и потоков электронов авроральной плазмы с энергией от 1 до 20 кэВ. На спутниках миссии RBSP/Van Allen probes измерялись потоки электронов с релятивистскими энергиями вблизи экваториальной плоскости. Во время отобранных событий определялось положение внешней границы внешнего радиационного пояса относительно аврорального овала, что позволяло анализировать роль авроральных явлений в динамике пояса. Прослеживались изменения наклонов спектров релятивистских электронов во время главной фазы бури и фазы восстановления, что позволяло прояснить роль адиабатического эффекта в динамике потоков.

Положения, выносимые на защиту:

1. Граница захвата энергичных электронов во время всех исследованных магнитных бурь была локализована внутри проекции аврорального овала на экваториальную плоскость и может совпадать с полярной границей овала.
2. Основной причиной резкого падения потоков релятивистских электронов во время главной фазы бури, при высокой суббуревой активности, является адиабатический эффект.
3. Увеличение интенсивности потоков релятивистских электронов во время фазы восстановления магнитной бури между суббурями не сопровождается увеличением жесткости спектра, что свидетельствует в пользу действия адиабатического механизма ускорения.

4. Временной масштаб резкого подъема спектра релятивистских электронов вблизи формирующегося максимума внешнего пояса не превышает 6 часов.

Степень достоверности и апробация результатов

Степень достоверности изложенных в работе результатов обеспечивается использованием надежных данных отечественных и зарубежных экспериментов. Выносимые на защиту положения работы опубликованы в рецензируемых журналах, относящихся к списку WoS и RSCI, обсуждены на семинарах, конференциях и на рабочих совещаниях.

По теме диссертации в соавторстве опубликовано 6 научных работ [A1-A6] в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечни WoS и RSCI.

Результаты работ докладывались на:

- Двенадцатой (06-11 февраля 2015), Тринадцатой (12-16 февраля 2016), Четырнадцатой (11-15 февраля 2017), Пятнадцатой (10-14 февраля 2020), Шестнадцатой 8-12 февраля 2021) ежегодных конференциях «Физика плазмы в солнечной системе»;
- The 40th (13-17 March 2017), 43th (10-13 March 2020), 44th (15 – 19 March 2021) annual seminars "Physics of auroral phenomena", Apatity;
- The 42th COSPAR Scientific Assembly, 14 - 22 July 2018, Pasadena, CA, USA;
- 14th International Conference on Substorms (ICS14), Tromsø, Norway, September 30th - October 4th, 2019.

Личный вклад автора состоит в получении основных результатов работы. Результаты, вошедшие в диссертацию, получены автором самостоятельно при консультациях с научным руководителем и сотрудниками лаборатории космического мониторинга Отдела космических наук НИИЯФ МГУ и сотрудниками кафедры физики космоса. Роль автора в получении результатов, выносимых на защиту, является определяющей. Личное участие автора в получении результатов, изложенных в работе, подтверждено соавторами и отражено в совместных публикациях.

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 5 статьях [A1–A5], индексируемых в Web of Science, в 1 статье [A6], индексируемой RSCI. Вклад автора диссертации в статьи [A1-A3] был важен для выполнения работы. Вклад автора диссертации в статьи [A4-A6] был определяющим.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложения. Полный объем работы составляет 119 страниц, 54 рисунка. Общее число наименований литературы во всех главах, включая публикации автора — 208.

В **первой главе** приведены результаты, полученные ранее и результаты, полученные с участием автора диссертации на первых этапах исследования. Глава написана с использованием материалов из работ автора [A1-A3].

Рассмотрены процессы в магнитосфере Земли, приводящие к образованию основных магнитосферных структур и формированию радиационных поясов, включая результаты, суммированные в работе [A1]. Проанализированы вопросы крупномасштабной магнитосферной динамики, имеющие непосредственное значение для выяснения процессов формирования внешнего радиационного пояса. Проанализированы основные результаты последних исследований крупномасштабных магнитосферных доменов. Рассмотрен вопрос о проецировании аврорального овала на экваториальную плоскость [A1].

Рассмотрены роль магнитосферных бурь и суббурь в формировании внешнего радиационного пояса. Обсуждены модели формирования радиационных поясов за счет радиальной диффузии, включая радиальный транспорт за счет внезапных импульсов (магнитная диффузия) [Тверской, 1968] и резонансного взаимодействия частиц с низкочастотными волнами [Fälthammar, 1965] (электрическая диффузия).

Проанализированы особенности формирования внешнего радиационного пояса. В ходе анализа отмечено, что описание процессов формирования пояса, основанное на решении уравнения Фоккера-Планка для плотности частиц в фазовом пространстве адиабатических инвариантов (PSD – phase space density) и рассматривающее ускорение и потери частиц как суперпозицию радиальной диффузии и диффузии по импульсу и питч-углу, встречается с принципиальными трудностями. К таким трудностям относятся невозможность описать процессы во время магнитных бурь, при которых потоки релятивистских электронов восстанавливаются после бури (магнитные бури третьего типа в соответствии с классификацией [Reeves et al., 2003]) и объяснить выполнение соотношения [Тверская, 2011], связывающего модуль минимальной Dst вариации во время бури с положением максимума формирующегося после бури радиационного пояса. На Рис. 1 из работы [A2] приведены примеры магнитных бурь, после которых произошли нарастания потоков релятивистских электронов (а), падения потоков (б) и восстановление потоков до предбуревых уровней (с). На второй и третьей панели приведены потоки электронов с энергиями 1.8 и 2.1 МэВ, определенные по данным прибора ECT-REPT

(Relativistic Electron-Proton Telescope) [Baker et al. 2013; Spence et al. 2013] на спутнике RBSP-A миссии RBSP/Van Allen probes [http://cdaweb.gsfc.nasa.gov], на первой панели SYM-H, на четвертой скорость солнечного ветра, на пятой и шестой AL индекс геомагнитной активности и Bz компонента межпланетного магнитного поля (ММП) (https://cdaweb.sci.gsfc.nasa.gov; http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp).

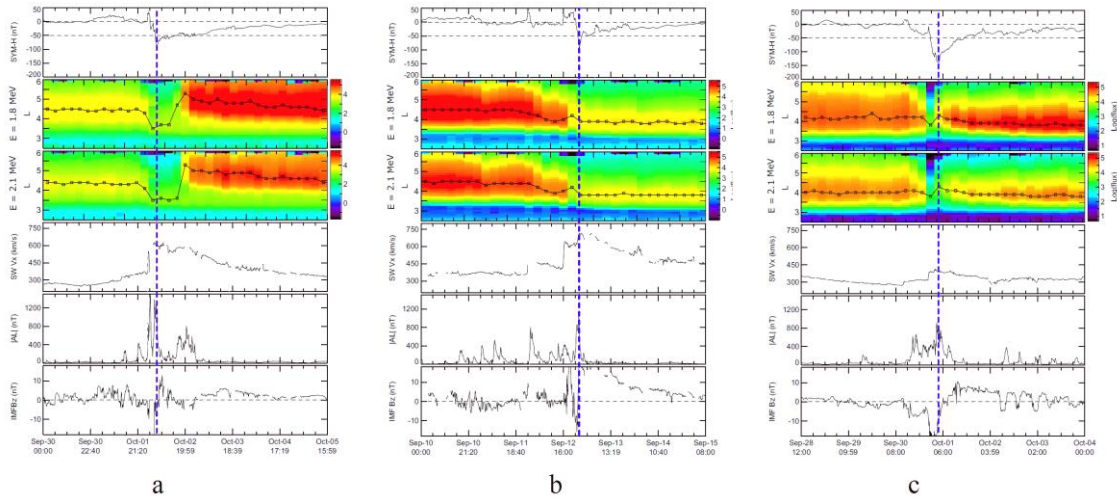


Рис. 1. Магнитные бури трех типов из работы [A2]

После бури 1 октября 2013 г. (буря первого типа) потоки релятивистских электронов возросли (а), после бури 12 сентября 2012 г. (буря второго типа) потоки резко упали (б), а после бури 30 сентября 2012 г. (буря третьего типа) на $L < 5$ вернулись к предбуревому уровню (с). В работе [A2] показано, что при бурях первого типа, в отличие от бурь второго и третьего типа, наблюдаются интенсивные суббури во время фазы восстановления бури. Необратимые потери частиц при пересечении магнитопаузы дрейфовыми траекториями частиц («затенение магнитопаузой») может объяснить возникновение бурь второго типа [Ripoll et al., 2019].

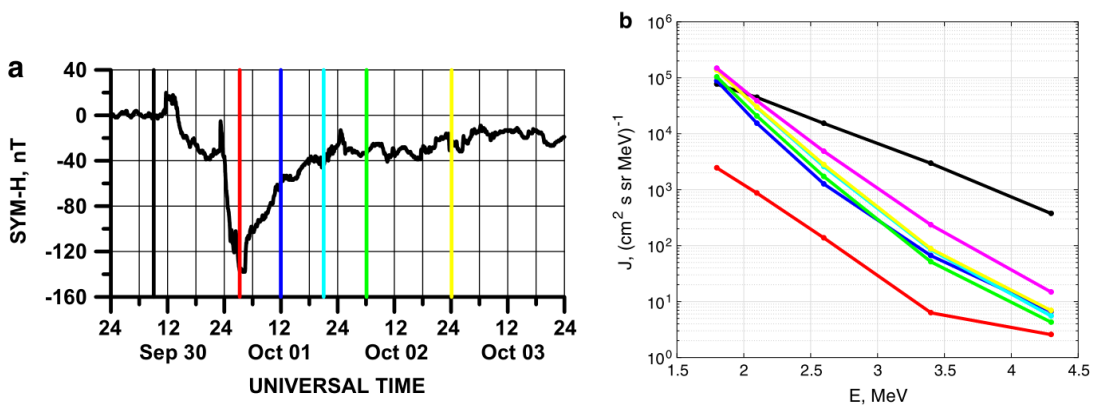


Рис. 2. Наклоны спектров релятивистских электронов в различные моменты бури 30 сентября 2012 г. [A2]

Для объяснения восстановления потоков во время бурь третьего типа было предположено [A2], что возникают условия, при которых потери электронов незначительны, а наблюдаемое падение потоков во время главной фазы бури связано с адиабатическим эффектом.

Показанные на Рис. 2 из работы [A2] вариации наклонов спектров релятивистских электронов, при которой потоки релятивистских электронов резко на 2-3 порядка упали на главной фазе бури, а потом восстановились до предбурового уровня на энергии ~ 2 МэВ, подтвердили данное предположение. Такие вариации потоков характерны при действии адиабатического эффекта [Kim and Chan, 1997; Лазутин, 2004]. При этом, наклоны спектров во время главной фазы бури почти не изменялись. Данная закономерность возникает при адиабатических изменениях для степенных спектров. Загиб спектра при энергиях >3.5 МэВ в максимуме бури (красная кривая) связан с высоким уровнем шумов при малых потоках частиц.

Обсужден вопрос об образовании зазора между внешним и внутренним радиационными поясами. Рассмотрены особенности адиабатического механизма падения и увеличения потоков релятивистских электронов во время бури, включая бетатронное замедление при падении магнитного поля в экваториальной плоскости и ускорение при возрастании магнитного поля, и полностью адиабатический эффект, обусловленный уходом частиц на большие геоцентрические расстояния при сохранении третьего адиабатического инварианта. Адиабатический эффект мог быть учтен при анализе динамики потоков релятивистских электронов во время бури, если бы удалось адекватным образом определить плотности частиц в пространстве адиабатических инвариантов (PSD). Такое определение требовало использование моделей магнитного поля, учитывающих быстрые изменения поля во время магнитной бури. Такие модели до настоящего времени не были развиты. Поэтому при анализе результатов измерений на спутниках миссии RBSP/Van Allen probes использовались усредненные модели поля [Reeves et al., 2013; Ripoll et al., 2019], что привело к определенным трудностям команды проекта и к постановке задач настоящего исследования.

В Главе 1 сформулированы основные направления исследований, среди которых, определение локализации внешней границы радиационного пояса относительно аврорального овала и анализ вариаций наклонов спектров релятивистских электронов в области максимума, формирующегося после бури радиационного пояса. Исследования были направлены на определение роли авроральных процессов в динамике внешнего пояса и изучение вариаций спектров релятивистских электронов вблизи экваториальной плоскости с целью выделения роли адиабатического эффекта.

Вторая глава посвящена определению положения границы внешнего радиационного пояса относительно аврорального овала. Глава написана с использованием материалов из работ автора [А3, А4, А6].

В главе рассмотрены результаты ранних работ по определению положения границы захвата относительно аврорального овала и причины, по которым задача не была решена на первых этапах космических исследований [А3]. Результаты работы, выполненные по данным спутника Метеор-М №1 отечественного проекта МЕТЕОР, показали, что в зависимости от интенсивности потоков в авроральном овале и радиационном поясе, резкое падение потоков электронов с энергией >100 кэВ, рассматриваемое в качестве границы внешнего радиационного пояса, может быть локализовано внутри овала и к экватору от овала. Статистическое исследование в магнитоспокойных условиях при индексах геомагнитной активности $AE > 150$ нТл и $AE < 150$ нТл (более 6000 пересечений овала в северной и южной полусферах) показало, что, в большинстве случаев, граница захвата электронов с энергией >100 кэВ в спокойных геомагнитных условиях была локализована внутри аврорального овала. Но в работе [А3] не рассматривалось положение границы захвата во время магнитных бурь.

Было хорошо известно, что характер движения структур внутри овала и положение овала сильно отличается во время магнитных бурь от магнитоспокойного времени. Во время бури почти постоянно наблюдается активное движение авроральных структур и повышенный уровень магнитосферной турбулентности. Во время бури также наблюдается движение овала к экватору и его расширение. Такие особенности могли быть существенными для определения положения границы захвата электронов внешнего радиационного пояса относительно аврорального овала.

В главе описаны особенности измерений потоков частиц и плазмы на спутнике Метеор-М № 2, принципы, в соответствии с которыми проводился отбор магнитных бурь для исследования во время работы спутника Метеор-М № 2, методика определения положения экваториальной границы аврорального овала и внешней границы радиационного пояса, приведены результаты исследования положения границы захвата энергичных электронов относительно аврорального овала во время ряда магнитных бурь.

Приводятся результаты подробного анализа 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 $Dst = -155$ нТл и ряда других магнитных бурь с меньшими модулями Dst . Описаны особенности развития каждой бури и вариации параметров солнечного ветра во время каждой исследованной бури. Прослежена динамика положения границ овала и границы захвата во время бури и определено

расстояние между границей захвата и экваториальной границей аврорального овала на различных фазах бури.

На Рис. 3 из работы [A4] приведен пример пересечения аврорального овала во время главной фазы большой магнитной бури первого типа 19-22 декабря 2015 г.

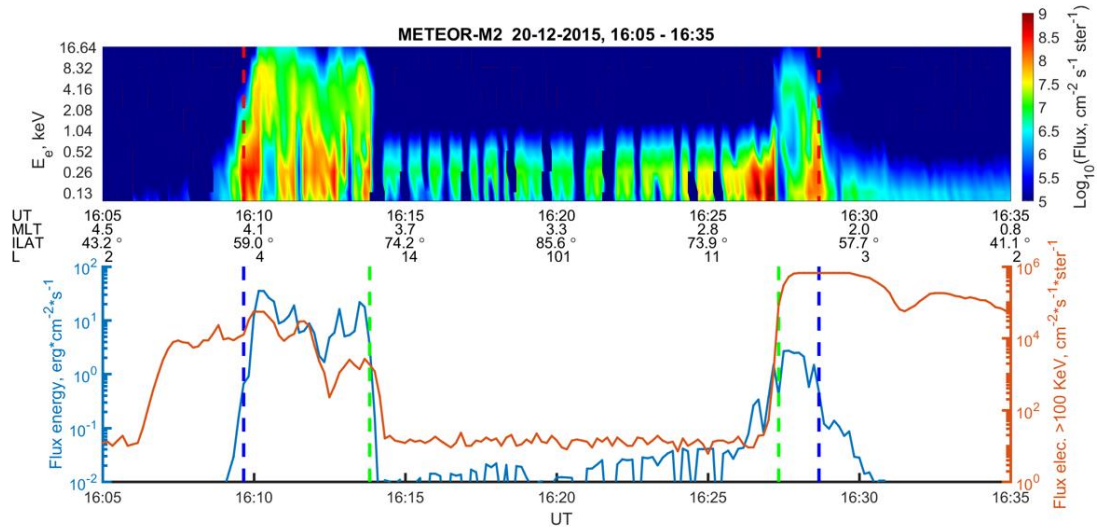


Рис. 3. Пересечение овала в середине главной фазы бури 19-22 декабря 2015 г.

Верхняя панель - спектрограммы электронов в диапазоне энергий от 0.13 до 16.64 кэВ. Нижняя панель - потоки энергии электронов плазмы (синяя кривая) и поток электронов с энергией >100 кэВ (оранжевая кривая). Вертикальной штриховой зеленой линией обозначена граница захвата электронов с энергией >100 кэВ, синей пунктирной – экваториальная граница овала в соответствии с выбранными критериями автоматического выделения границ.

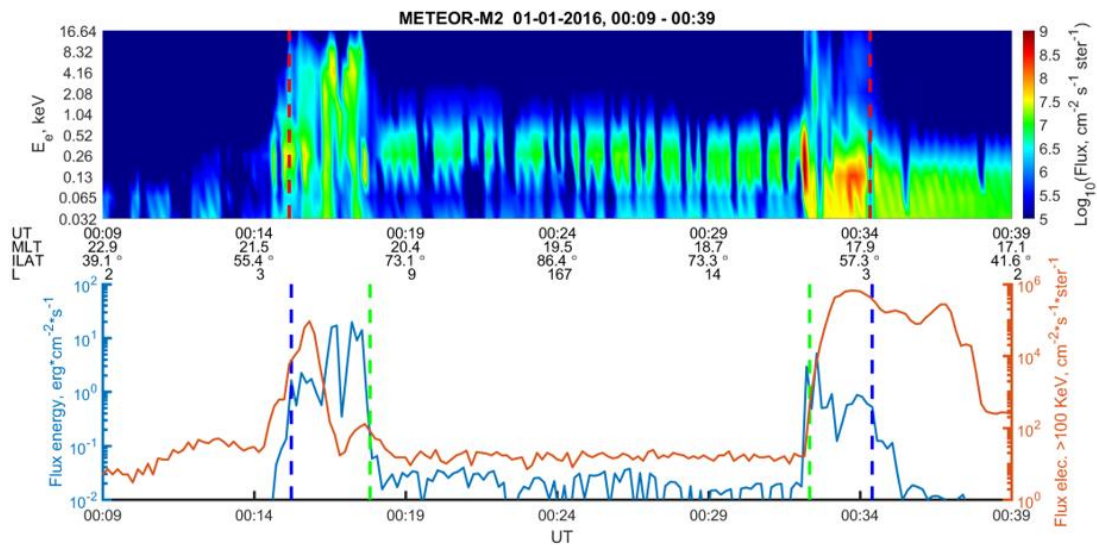


Рис. 4. Пересечение овала во время бури 31 декабря 2015 г. – 2 января 2016 г. при минимальном за бурю значении $Dst = -110$ нТл

На Рис. 4 показано пересечение овала во время бури 31 декабря 2015 г. – 2 января 2016 г. при минимальном за время бури значении $Dst = -110$ нТл. В результате анализа всех пересечений овала во время исследованных магнитных бурь была зафиксирована локализация границы захвата энергичных электронов внутри аврорального овала. Во время ряда пролетов было обнаружено совпадение границы захвата с полярной границей овала. Такое совпадение можно увидеть на Рис.3 в 16:27 UT и на Рис.4 00:32 UT.

Определение положения границы захвата энергичных электронов с энергией >100 кэВ по резкому падению потока до уровня фона относительно экваториальной границы аврорального овала показало частичное пересечение области внешнего радиационного пояса с окружающим Землю плазменным кольцом, в котором течет часть кольцевого тока. Дрейфовые траектории основной части частиц внешнего пояса внутри данной структуры могут быть замкнуты внутри магнитосферы, что свидетельствует о возможности действия адиабатического эффекта за счет падения магнитного поля внутри кольцевого тока. Проверка такого предположения требовала анализа данных наблюдений вблизи экваториальной плоскости, что могло быть осуществлено по данным миссии RBSP/Van Allen probes находящихся в открытом доступе (<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov>).

В третьей главе рассмотрены вариации наклонов спектров релятивистских электронов вблизи максимума формирующегося в ходе бури внешнего радиационного пояса. Глава написана с использованием материалов из работ автора [A5] и [A6].

В главе описана методика определения роли адиабатических и стохастических механизмов ускорения по данным миссии RBSP/Van Allen probes, особенности работы прибора ECT-REPT, данные которого использовались при анализе вариаций величины потоков и наклонов спектров релятивистских электронов. В основном, анализировались дифференциальные спектры электронов с энергией от 1.8 до 4.5 МэВ, что обеспечивало устойчивость вариаций наклонов спектров. Определялись вариации потоков релятивистских электронов вдоль траектории полета спутника RBSP-A и сравнивались спектры в области максимума формирующегося нового радиационного пояса, при последовательном пересечении спутником области максимума. Для определения области максимума использовалось соотношение Тверской [Тверская, 2011], которое получило в последнее время многочисленные подтверждения в ходе анализа данных миссии RBSP/Van Allen probes [Moya et al., 2017; Boyd et al., 2018; Antonova and Stepanova, 2015; Zhao et al., 2019]. Параллельно проходила проверка соотношения Тверской для отобранных для анализа магнитных бурь.

Проведен подробный анализ вариаций потоков и спектров электронов во время магнитных бурь 19–22 декабря 2015 г., 13–14 октября 2016 г., 20–22 января 2016 г. и 31 декабря 2015 г. – 2 января 2016 г. Определены наклоны всех проанализированных спектров (см. Приложение к диссертации). При анализе было учтено, что чисто адиабатический эффект не приводит к изменению наклона степенного спектра, а действие стохастических механизмов ускорения приводит к увеличению жесткости спектра. Принято во внимание смещение во время бури дрейфовых траекторий в область формирующегося максимума пояса электронов из внутренних областей магнитосферы.

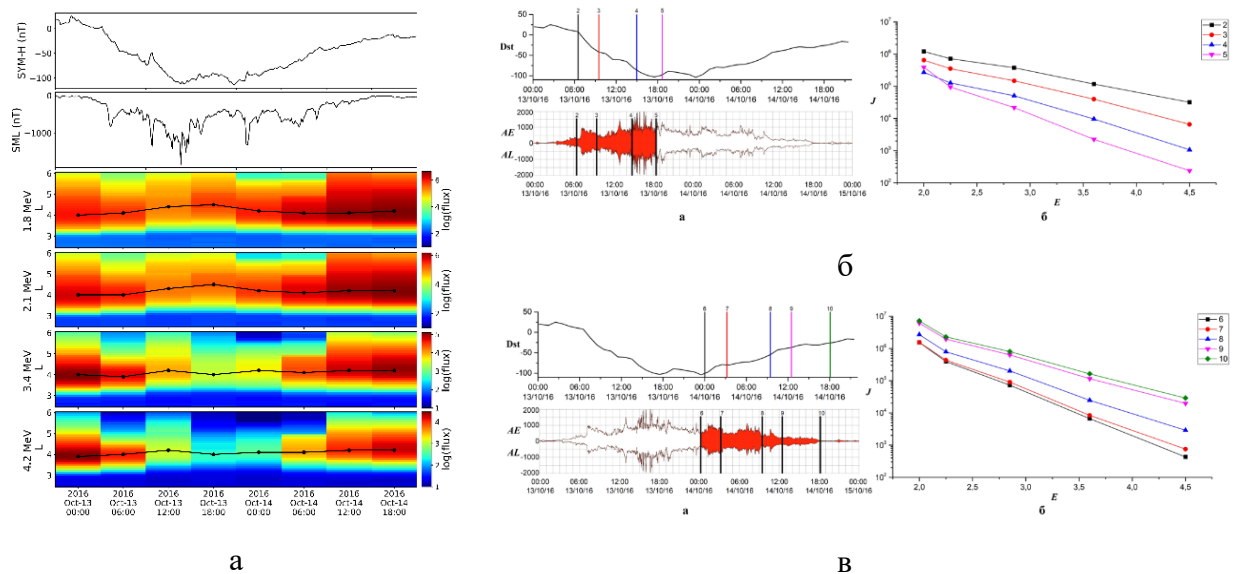


Рис. 5. Вариации дифференциальных потоков релятивистских электронов (а) и наклонов спектров во время главной фазы (б) и фазы восстановления магнитной бури (в) 13-14 октября 2016 г.

На Рис. 5 приведен пример анализа вариаций дифференциальных потоков релятивистских электронов и наклонов спектров во время магнитной бури 13-14 октября 2016 г. [А6]. На Рис. 5а последовательно приведены SYM-H вариация (аналог Dst с минутным разрешением), SML (аналог AL индекса), определяемые по сети Intermagnet (<http://supermag.jhuapl.edu>, <http://supermag.uib.no>), вариации потоков релятивистских электронов с энергиями 1.8, 2.1, 3.4 и 4.2 МэВ. На Рис. 5 б, в вариации интенсивности и наклонов спектров в области максимума формирующегося радиационного пояса в моменты бури, выделенные вертикальными прямыми во время главной фазы бури и фазы восстановления, соответственно. Выделены вариации, которые являются следствием действия адиабатического эффекта, и вариации, связанные с действием неадиабатических эффектов.

В **заключении** излагаются итоги выполненного исследования, выводы, рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы.

В работе проведены исследования, позволяющие прояснить ряд закономерностей формирования внешнего радиационного пояса магнитосферы Земли во время магнитных бурь, которые было трудно понять, используя развиваемые в последнее время подходы. Считалось, что роль магнитосферных суббурь в динамике внешнего пояса ограничивается созданием затравочной популяции энергичных электронов, которые ускоряются в хвосте, а затем переносятся внутрь магнитосферы. При этом считалось, что овал полярных сияний проецируется на хвост магнитосферы, а экваториальная граница овала совпадает с полярной границей внешнего радиационного пояса. Однако, в ходе исследований положения границы захвата электронов, с энергией >100 кэВ, которая считается внешней границей внешнего радиационного пояса, и аврорального овала при использовании данных наблюдений спутника МЕТЕОР-М № 1 удалось показать, что в большинстве случаев граница захвата находится внутри овала в магнитоспокойных условиях. Продолжением таких исследований явился анализ результатов наблюдений на спутнике МЕТЕОР-М № 2 во время магнитных бурь с $|Dst| > \sim 100$ нТл во Второй главе работы. В ходе проведенного анализа удалось зафиксировать положение границы захвата внутри аврорального овала и, в ряде случаев, зафиксировать совпадение внешней границы радиационного пояса с полярной границей овала во время всех рассмотренных бурь. Данный результат свидетельствует о недооценке роли авроральных процессов во время бури, так как на широтах аврорального овала постоянно регистрируется высокий уровень волновой активности в широком диапазоне частот, а во время суббурь развиваются мощные индукционные электрические поля, ускоряющие частицы. Доказательство действия процессов ускорения в области, где траектории энергичных частиц замкнуты внутри магнитосферы, проясняет действие адиабатического механизма вариаций потоков релятивистских электронов, так как потоки релятивистских электронов могут падать на порядки величины в условиях, когда не происходят необратимые потери за счет высыпаний частиц и «затенением» магнитопаузой. Существование суббуревых инъекций внутри области внешнего радиационного пояса и высокого уровня волновой активности при реализации различных неадиабатических механизмов приводит к увеличению потоков энергичных электронов в области уменьшенного поля. Восстановление поля при сохранении магнитного момента электрона приводит к нарастаниям потоков на несколько порядков величины. Такие процессы характерны для бурь первого типа, при которых после бури фиксируются возрастания потоков релятивистских электронов на порядки величины. При бурях второго типа, видимо, преобладают необратимые потери частиц во время

главной фазы бури, и после бури внешний радиационный пояс практически исчезает. При бурях третьего типа, когда нет повышенной суббуревой и волновой активности на фазе восстановления бури, не происходит ускорения частиц на широтах аврорального овала. При восстановлении магнитного поля после бури потоки релятивистских электронов возвращаются к исходному уровню.

В ходе анализа изменений наклонов спектров во время магнитных бурь в третьей главе работы, использовалось, в настоящее время, многократно подтвержденное соотношение Тверской, и анализировались изменения наклонов спектров вблизи максимума формирующегося после бури радиационного пояса. Справедливость соотношения Тверской была подтверждена для каждой из исследованных бурь. Традиционно используемая степенная аппроксимация спектров основывалась на результатах работ по капта-аппроксимациям спектров частиц в бесстолкновительной плазме, при которых может быть выделено максвелловское ядро и степенной хвост. При больших значениях показателя спектра (~ 10 и более) капта-распределение переходит в максвелловское распределение. Определение наклона спектра в ходе анализа позволяло в большинстве случаев отделять адиабатические процессы, не меняющие показатель спектра, от неадиабатических (при степенной аппроксимации спектра, скорее всего, стохастических) которые приводят к увеличению жесткости спектра. Случаи заметного отклонения спектров от степенных удавалось объяснить за счет высокого уровня сравнительно крупномасштабных флуктуаций электрического и магнитного полей во время бури и суббуревых инъекций в области пояса.

Полученные результаты анализа изменений наклонов спектров релятивистских электронов во время бурь дали возможность выделить роль адиабатических и неадиабатических процессов в изменениях потоков частиц внешнего радиационного пояса. Удалось показать, что адиабатические процессы вносят доминирующий вклад в вариациях интенсивности электронных потоков. При этом, суббуревые инъекции внутри кольцевого тока обеспечивают появление ускоренных затравочных потоков электронов в области уменьшенного магнитного поля. Такие потоки нарастают в процессе адиабатического ускорения при восстановлении магнитного поля во время фазы восстановления бури.

Наблюдались изменения потоков частиц и наклонов спектров во время суббуревых возмущений. Проведенный анализ свидетельствует 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 между суббурами и подтверждает предположение работ [Тверской, 1997; Antonova, 2006] о роли суббуревых инъекций в области ослабленного поля в качестве необходимого условия формирования высоких потоков электронов - «киллеров» спутников. Необходимо отметить, что зарегистрированные появления релятивистских электронов после изолированных суббурь [Foster et al., 2017; Pinto et al., 2020] подтверждает данное предположение. При этом возможно действие нелинейных механизмов взаимодействия волна частица или локальное ускорение всплесками электрического поля во время диполизаций. Но прояснение роли различных процессов во время суббуревых диполизаций требует дальнейшего изучения. Для прояснения механизмов ускорения не удастся пока оценить роль резонансного взаимодействия с УНЧ волнами [Elkington et al., 1999] и ускорения высокочастотными электростатическими колебаниями, которые пока мало анализировались.

Особенностью проведенного исследования является использование одновременных наблюдений отечественного спутника МЕТЕОР-М № 2 и данных наблюдений проекта RBSP/Van Allen Probes, что обеспечило возможность прояснить роль адиабатических и неадиабатических процессов в динамике внешнего радиационного пояса. Доказанное по измерениям в проекте МЕТЕОР-М перекрывание областей аврорального овала и внешнего радиационного пояса указывало на доминирующую роль авроральных процессов в динамике внешнего пояса. Во время бури авроральный овал движется к экватору и суббуревые активации, формирующие затравочную популяцию для формирования внешнего радиационного пояса, развиваются на широтах, где во время фазы восстановления бури формируется максимум нового пояса. При этом проецирование основной части аврорального овала на внешнюю часть кольцевого тока обеспечивает возможность захвата ускоренных частиц на замкнутые вокруг Земли дрейфовые траектории. Не все траектории энергичных частиц в этой области замкнуты внутри магнитосферы. Увеличение волновой активности приводит к усилению радиальной диффузии за счет взаимодействия с УНЧ волнами. Увеличение уровня циклотронных волн приводит к усилению питч-угловой диффузии и высыпаниям частиц в атмосферу. Асимметричные искажения магнитной конфигурации могут усилить эффект «затенения» магнитопаузой. Но падение B_z компоненты магнитного поля в области экватора внутри кольцевого тока с последующим восстановлением, видимо, может обеспечить формирование больших потоков релятивистских электронов.

В ходе работы были получены следующие выводы:

- Впервые обнаруженное в ходе исследования совпадение полярной границы радиационного пояса с полярной границей овала исключают универсальный характер принятой в предыдущих исследованиях картины, в соответствии с которой радиационный пояс формируется к экватору от овала, а весь овал проецируется на плазменный слой.
- Показано, что основной причиной резкого падения потоков релятивистских электронов во время главной фазы бури, при высокой суббуревой активности, является адиабатический эффект, возникающий в результате падения магнитного поля в экваториальной плоскости. Такое падение приводит как к уменьшению энергии частицы в результате сохранения первого адиабатического инварианта, так и к уходу частиц на большие геоцентрические расстояния при сохранении третьего адиабатического инварианта. Получено доказательство действия данного механизма в ходе анализа динамики наклонов спектров релятивистских электронов во время главной фазы бури.
- Анализ изменений наклонов спектров релятивистских электронов показал, что во время фазы восстановления магнитной бури увеличение интенсивности потоков между суббурами не сопровождается увеличением жесткости спектра, что свидетельствует в пользу действия адиабатического механизма ускорения при увеличении магнитного поля в экваториальной плоскости и сохранении магнитных моментов релятивистских электронов.
- Наблюдения потоков релятивистских электронов вблизи максимума формирующегося внешнего радиационного пояса показали, что характерное время ускорения частиц пояса не превышает 6 часов, что трудно объяснить используя предположение об ускорении электронов хоровыми волнами.

Перспективы работы:

Прделанная работа позволила получить ряд результатов, проясняющих динамику внешнего радиационного пояса во время магнитных бурь. Показано, что резкое падение потоков релятивистских электронов во время главной фазы бури, в основном, связано с адиабатическим эффектом. Данный эффект приводит также к увеличению потоков во время фазы восстановления магнитной бури. При этом вероятно действие быстрых механизмов ускорения на временных масштабах магнитосферных суббурь, которое требует дополнительного анализа.

Публикации автора по теме диссертации в рецензируемых журналах, индексируемых Web of Science и RSCI

- A1. Antonova E.E., Stepanova M., Kirpichev I.P., Ovchinnikov I.L., Vorobjev V.G., Yagodkina O.I., Riazantseva M.O., Vovchenko V.V., Pulinets M.S., Znatkova S.S., **Sotnikov N.V.** Structure of magnetospheric current systems and mapping of high latitude magnetospheric regions to the ionosphere, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v. 177, p. 103–114, 2018. doi:10.1016/j.jastp.2017.10.013 **IF (WOS) =1.735**
- A2. 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*, 70:127, 11 p., 2018. doi:10.1186/s40623-018-0898-1 **IF (WOS) =2.363**
- A3. Riazantseva M.O., Antonova E.E., Stepanova M.V., Marjin B.V., Rubinshtein I.A., Barinova V.O., **Sotnikov N.V.** Relative positions of the polar boundary of the outer electron radiation belt and the equatorial boundary of the auroral oval. *Annales Geophysicae*, v. 36, p. 1131–1140, 2018. doi:10.5194/angeo-36-1131-2018 **IF (WOS) =1.585**
- A4. **Сотников Н. В.**, Антонова Е. Е., Рязанцева М. О., Баринаова 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., *Геомагнетизм и Аэрномия*, 2019, Т. 59, № 2, с. 148–159, doi:10.1134/S0016794019020147 (перевод: Sotnikov N. V., Antonova E. E., Ryazantseva M. O., Barinova V. O., Rubinshtein I. A., Mit' S. K., Position of the Energetic Electron Trapping Boundary Relative to Auroral Oval Boundaries during the Magnetic Storm on December 19–22, 2015, Based on Data from the Meteor-M2 Satellite, *Geomagnetism and Aeronomy*, 2019, Vol. 59, No. 2, pp. 136–146, doi:10.1134/S0016793219020142) **IF(WOS)=0.7**
- A5. **Сотников Н. В.**, Антонова Е. Е., Рязанцева М. О., Овчинников И.Л., Рубинштейн И. А., Баринаова В. О., Мить С. К., Спектры и питч-угловые распределения релятивистских электронов вблизи максимума внешнего радиационного пояса во время магнитной бури 19-22 декабря 2015 г., *Геомагнетизм и Аэрномия*, 2019, Т. 59, № 6, с. 696–705, doi:10.1134/S0016794019060129 (перевод: Sotnikov N. V., Antonova E. E., Ryazantseva M. O., Ovchinnikov I. L., Rubinstein I. A., Barinova V. O., Mit' S. K., Spectra and Pitch-Angular Distributions of Relativistic Electrons Near the Outer Radiation Belt During the Magnetic Storm of December 19–22, 2015, *Geomagnetism and Aeronomy*, 2019, Vol. 59, No. 6, pp. 651–659, doi:10.1134/S0016793219060124) **IF (WOS) =0.7**
- A6. **Сотников Н. В.**, Е. Е. Антонова, И. Л. Овчинников, В. Г. Воробьев, О. И. Ягодкина, М. С. Пулинец, Формирование внешнего радиационного пояса во время геомагнитных бурь и адиабатический механизм падения и возрастания потоков

релятивистских электронов, Известия РАН. Серия физическая, 2021, том 85, № 3, с. 416–421. doi:10.31857/S0367676521030297 (перевод: Sotnikov N.V., E.E. Antonova, I.L. Ovchinnikov, V.G. Vorobjev, O.I. Yagodkina, and M.S. Pulinets, Formation of the outer radiation belt during geomagnetic storms and the adiabatic mechanism of the rise and fall of relativistic electron fluxes, Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2021, Vol. 85, No. 3, pp. 309–313. doi:10.3103/S1062873821030278) **IF (RSCI) =0.23**

Список литературы

1. *Лазутин Л.Л.* О структуре возмущенной магнитосферы, Косм. исслед., т. 42, № 5, с. 534–538. 2004.
2. *Тверская Л.В.* Диагностика магнитосферы по релятивистским электронам внешнего пояса и проникновению солнечных протонов (обзор), Геомагнетизм и аэрономия, т. 51, № 1, с. 8–24, 2011. doi:10.1134/S0016793211010142
3. *Тверской Б.А.*, Динамика радиационных поясов Земли, – М. Наука, 1968, 223 с.
4. *Тверской Б.А.*, Механизм формирования структуры кольцевого тока магнитных бурь, Геомагнетизм и аэрономия, т. 37, № 5, с. 555–559, 1997.
5. *Antonova E.E.*, Stability of the magnetospheric plasma pressure distribution and magnetospheric storms, Adv. Space Res., v. 38, p. 1626–1630, 2006. doi:10.1016/j.asr.2005.05.005
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, 2015. doi:10.1186/s40623-015-0319-7
7. *Baker D.N., Kanekal S.G., Hoxie V.C., Batiste S., 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, p. 337–381, 2013. doi:10.1007/s11214-012-9950-9
8. *Boyd A. J., Turner D. L., Reeves G. D., Spence H. E., Baker D. N., & Blake J. B.*, What causes radiation belt enhancements: A survey of the Van Allen Probes Era, Geophysical Research Letters, v. 45, p. 5253–5259, 2018. doi:10.1029/2018GL077699
9. *Elkington S.R., Hudson M.K., Chan A.A.*, Acceleration of relativistic electrons via drift-resonant interaction with toroidal-mode Pc-5 ULF oscillations, Geophys. Res. Lett., v. 26, p. 3273–3276, 1999.
10. *Fälthammar C.G.*, On the transport of trapped particles in the outer magnetosphere, J. Geophys. Res., v. 70, p. 2503–2512, 1965.

11. *Foster J.C., Erickson P.J., Omura Y., Baker D.N., Kletzing C.A., Claudepierre S.G., Van allen probes observations of prompt MeV radiation belt electron acceleration in nonlinear interactions with VLF chorus, J. Geophys. Res. (Space Phys.), v. 122, No 1, p. 324–339, 2017. doi:10.1002/2016JA023429*
12. *Kim H-J, Chan A.A. Fully adiabatic changes in storm time relativistic electron fluxes, J. Geophys. Res., v. 102, No A10, p. 22107–22116, 1997. doi:10.1029/97JA018*
13. *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, No 11, p. 11,100-11,108, 2017. doi:10.1002/2017JA024735*
14. *Pinto V.A., Bortnik J., Moya P.S., Lyons L.R., Sibeck D.G., Kanekal S.G., Spence H.E., Baker D.N., Radial response of outer radiation belt relativistic electrons during enhancement events at geostationary orbit, J. Geophys. Res. (Space Phys.), v. 125, No 5, e2019JA027660, 2020. doi:10.1029/2019JA027660*
15. *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, No 10, 2003. doi:10.1029/2002GL016513*
16. *Reeves G.D., Spence E., Henderson M.G., Morley S.K., Friedel R.H.W., Funsten H.O., Baker D.N., Kanekal S.G., Blake J.B., Fennell J.F., Claudepierre S.G., Thorne R.M., Turner D.L., Kletzing C.A., Kurth W.S., Larsen B.A., Niehof J.T. Electron acceleration in the heart of the Van Allen radiation belts. Science 341:991, 2013. doi:10.1126/science.1237743*
17. *Ripoll J.-F., Claudepierre S.G., Ukhorskiy S.Y., Chris Colpitts, Xinlin Li, Joe Fenne, Chris Crabtree, Particle dynamics in the Earth's radiation belts: Review of current research and open questions, J. Geophys. Res. Space Phys., v. 125, Art. No. e2019-JA026735, 2019. doi:10.1029/2019JA026735*
18. *Spence H.E., Reeves G.D, Baker D.N., Blake J.B., 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. doi:10.1007/s11214-013-0007-5*
19. *Zhao H., Baker D.N., Li X., Jaynes A.N., and Kanekal S.G., The effects of geomagnetic storms and solar wind conditions on the ultrarelativistic electron flux enhancements, J. Geophys. Res., v. 124, No 3, p. 948-1965, 2019. doi:10.1029/2018JA02625*