

---

**ДИНАМИКА ЭЛЕКТРОННОГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА  
ВО ВРЕМЯ МАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ И В СПОКОЙНОЕ ВРЕМЯ**

**ELECTRON RADIATION BELT DYNAMICS DURING MAGNETIC STORMS  
AND IN QUIET TIME**

---

**Л.Л. Лазутин**

*Научно-исследовательский институт ядерной физики  
им. Д.В. Скобельцына, МГУ  
Москва, Россия, ll@srd.sinp.msu.ru, l.l.lazutin@gmail.com*

**А.В. Дмитриев**

*Научно-исследовательский институт ядерной физики  
им. Д.В. Скобельцына, МГУ  
Москва, Россия, dalex@jupiter.ss.ncu.edu.tw*

**А.В. Суворова**

*Научно-исследовательский институт ядерной физики  
им. Д.В. Скобельцына, МГУ  
Москва, Россия, all@yahoo.com*

**L.L. Lazutin**

*Scobeltsyn Institute of Nuclear Physics,  
Moscow State University  
Moscow, Russia, ll@srd.sinp.msu.ru, l.l.lazutin@gmail.com*

**A.V. Dmitriev**

*Scobeltsyn Institute of Nuclear Physics,  
Moscow State University  
Moscow, Russia, dalex@jupiter.ss.ncu.edu.tw*

**A.V. Suvorova**

*Scobeltsyn Institute of Nuclear Physics,  
Moscow State University  
Moscow, Russia, all@yahoo.com*

---

**Аннотация.** В работе рассмотрена динамика внешнего электронного радиационного пояса, адиабатические и неадиабатические механизмы пополнения и потерь энергичных электронов.

В свободное от магнитных возмущений время внешний электронный пояс постепенно опустошается: на внутренних оболочках вследствие сброса электронов в атмосферу, а в зоне квазизахвата, поскольку дрейфовые оболочки электронов там не замкнуты, вследствие потерь на магнитопаузе. Последний процесс маскируется пополнением свежескоренными частицами и мало заметен в обычные годы, но в годы экстремально низкой солнечной активности приводит к существенному понижению численности электронной популяции радиационного пояса.

На главной фазе магнитной бури основной причиной понижения интенсивности потока электронов является адиабатическое охлаждение, связанное с сохранением адиабатических инвариантов, дополненное сбросом электронов в атмосферу и гибелью их на магнитопаузе.

Возрастания потока электронов обуславливаются суммарным действием четырех процессов:  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ -заброса электронов глубоко к Земле импульсным индукционным электрическим полем суббулевой активизации, а также крупномасштабным электрическим полем солнечного ветра, в обоих случаях перенос частиц в область более сильного магнитного поля при сохранении магнитного момента приводит к росту их энергии. Тот же механизм ускорения работает при переносе электронов из-за радиальной диффузии, которая сопровождается питч-угловую диффузию. Четвертый процесс связан с адиабатическим подогревом частиц на фазе восстановления.

Степень восстановления потока электронов после бури определяется соотношением неадиабатических возрастаний и потерь, в результате значения потока составляют непрерывный ряд от низкого до сильно повышенного. Сочетание этих процессов определяет

**Abstract.** The paper discusses the dynamics of the outer electron belt, adiabatic and nonadiabatic mechanisms of replenishment and losses of energetic electrons.

Under undisturbed conditions, the outer electron belt gradually empties: in the inner magnetosphere due to electron precipitation in the atmosphere and in the quasi-trapping region due to losses at the magnetopause because drift shells of electrons are not closed there. The latter process does not occur in normal years due to the masking replenishment by freshly accelerated particles, but in years of extremely low activity it leads to a significant decrease in the electron population of the belt.

During the magnetic storm main phase, the first reason for the decrease in the electron flux intensity is the adiabatic cooling associated with conservation of adiabatic invariants and complemented by precipitation of electrons into the atmosphere and their dropout at the magnetopause. Electron flux increases involve  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  electron injection by the induction electric field of substorm activation and by the large-scale solar wind electric field, with pitch energy diffusion along with adiabatic heating in the recovery phase.

The rate of electron flux recovery after a storm is determined by the ratio of nonadiabatic increases and losses; hence the electron flux represents a continuous series from low to very high values. The combination of these processes determines the individual character of radiation belt development during each magnetic storm and the behavior of the belt in the quiet time.

**Keywords:** magnetosphere, electrons, radiation belt, replenishment and losses.

индивидуальный характер развития радиационного пояса во время каждой магнитной бури и поведение пояса в спокойные периоды.

**Ключевые слова:** магнитосфера, электроны, радиационный пояс, пополнения и потери.

## ВВЕДЕНИЕ

В существующих обзорах по радиационным поясам (РП) [Parks, Winkler 1968; Vernov et al., 1969; Friedel et al., 2002; Millan, Thorne, 2007; Shprits et al., 2008a] достаточно подробно описывается как структура РП, так и его формирование. Согласно принятой теории [Тверской, 1964, 1965], формирование РП объясняется сочетанием медленной радиальной диффузии электронов под действием небольших по величине импульсов магнитного поля с потерями в атмосфере из-за питч-угловой диффузии. В принципе, это объясняет наблюдаемую пространственную структуру захваченных электронов с провалом между внутренним и внешним РП.

Во время магнитных бурь этот стройный порядок нарушается, происходят динамические вариации, понижения и повышения потоков энергичных электронов. Потоки энергичных электронов-«киллеров» привлекают повышенное внимание исследователей, появляются работы, посвященные предсказанию их средних или пиковых значений [Li et al., 2001; Simms et al., 2016] (см. также обзор [Потапов, 2017]).

Большое число работ посвящено анализу динамики РП во время магнитных бурь [Baker et al., 1997; Li et al., 1997; Reeves et al., 1998; Yu et al., 2015; Hwang et al., 2015; Turner et al., 2017], среди них существенную часть составляют работы, выполненные в НИИЯФ МГУ [Вернов и др., 1965; Кузнецов и др., 1966; Бахарева, 2003; Иванова и др., 2000; Калегаяев и др., 2015; Antonova, 2005; Lazutin, 2012; Kalegaev, Vlasova, 2014; Dmitriev et al., 2010, 2014; Slivka et al., 2006; Tverskaya et al., 2005; Vernov et al., 1969]. В связи с этим нам представляется целесообразным сделать обзор современных представлений о динамике РП. Заметим, что обзор создавался в значительной мере на основе работ, выполненных в НИИЯФ МГУ.

В обзоре мы сначала опишем динамику РП во время магнитных бурь, затем остановимся на механизмах пополнения и потерь энергичных электронов и в завершение рассмотрим поведение РП в спокойное время. Мы ориентируемся на читателя, знакомого с базовыми понятиями: с характером движения частиц и адиабатическими инвариантами, динамикой полей и токов во время магнитных бурь и т. п.

## МАГНИТНЫЕ БУРИ

На рис. 1 приведены потоки энергичных электронов и протонов, измеренные на низковысотном спутнике SERVIS в период с 5 по 25 февраля 2004 г., в том числе во время магнитной бури 11.02.2004. Провалы интенсивности потоков наблюдаются во всех бурях, на всех оболочках РП, в широком диапазоне энергий и для частиц разных сортов. Вызы-

ваются эти провалы преимущественно изменением структуры магнитосферы под действием так называемого *Dst*-эффекта. Этот эффект обязательно присутствует на главной фазе бури, но возможны и дополнительные неадиабатические потери, в частности сброс частиц в атмосферу. Если нет процессов неадиабатических (потерь или ускорений), конфигурация РП и потоки частиц после бури должны восстановиться в точности.

Однако зачастую этого не происходит. После бури поток электронов может как вернуться к добуревому уровню, так и превысить его либо восстановиться не полностью. В известной работе [Reeves et al., 2003] бури поделены на эти три типа. На самом деле это деление условно (см. рис. 3, а, в [Reeves et al., 2003]). Если не обращать внимания на различие в значках, присвоенных автором, после бури наблюдается непрерывный ряд интенсивностей потоков электронов, меньших или больших по сравнению с добуревым значением. И создается этот ряд, на наш взгляд, различным соотношением потерь и возрастных потоков частиц во время бури: если потери превышают пополнения, поток восстанавливается не полностью, если не превышают — поток после бури будет больше добуревого.

## АДИАБАТИЧЕСКИЕ ВАРИАЦИИ (*Dst*-ЭФФЕКТ)

На главной фазе магнитной бури напряженность магнитного поля на внутренних силовых линиях падает. Дрейфовая оболочка, чтобы сохранить преж-

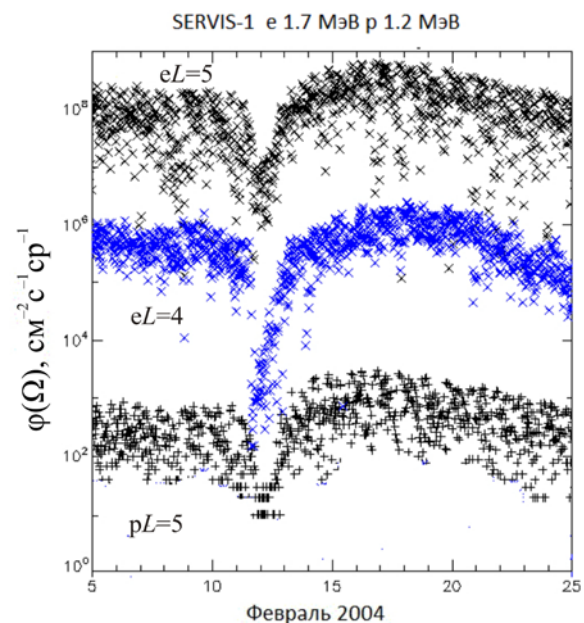


Рис. 1. Потоки электронов и протонов, измеренные на спутнике SERVIS-1 при пролетах указанных уровней  $L$  в Северном полушарии 5–25 февраля 2004 г. Магнитная буря с минимальным  $Dst = -110$  нТл произошла 11.02.2004

уровень магнитного потока, смещается наружу, в область, где силовые линии более длинные, поэтому, чтобы сохранить второй инвариант — расстояние между зеркальными точками, зеркальные точки смещаются по силовой линии вверх. Понижение напряженности магнитного поля в новой, более высокой зеркальной точке приводит к уменьшению энергии частицы, поскольку должен сохраняться первый адиабатический инвариант, он же магнитный момент.

Этот эффект был впервые описан Мак-Илвэйном [McIlwain, 1966] и позже в работе [Kim, Chan, 1997] назван *Dst*-эффектом. На главной фазе бури *Dst*-эффект всегда вызывает понижение интенсивности потоков электронов, которое служит основой для дополнительных неадиабатических эффектов.

На фазе восстановления магнитной бури должен произойти адиабатический возврат к добуревому состоянию, однако процессы потерь и ускорений уменьшат или увеличат число частиц, участвующих в процессе восстановления, что приведет к непрерывному ряду интенсивности потоков электронов.

Заметим, что рост давления солнечного ветра на начальной фазе магнитной бури, вызывающий не спад, как на главной фазе, а рост напряженности магнитного поля, вызовет обратный *Dst*-эффект — адиабатическое возрастание энергии захваченных в магнитную ловушку частиц и, соответственно, рост интенсивности их потоков. Часть близких к конусу потерь частиц из-за снижения положения зеркальных точек попадет в атмосферу и погибнет, но спутник, находящийся в РП, этой потери не регистрирует.

### АДИАБАТИЧЕСКИЕ ВАРИАЦИИ. АСИММЕТРИЯ УТРО—ВЕЧЕР

При изучении временного хода интенсивностей потоков электронов во время бури может возникнуть ложное впечатление исчезновения частиц из-за использования не изменяющейся во время бури траектории магнитного дрейфа, а *L*-координаты спокойного уровня возмущенности, которая обычно приводится в базе данных измерений на низковысотных спутниках.

На нашем рис. 1 (как и на многих рисунках из других работ) *L* используется как индикатор нормированного расстояния до вершины силовой линии, однако неправомерно использовать параметр *L* спокойного уровня возмущенности для описания динамики частиц в период магнитной бури. Поясним это утверждение конкретным примером.

В начале главной фазы бури асимметрия кольцевого тока создает ситуацию, когда регистрируется понижение потока электронов на вечерней стороне, в то время как на утренней поток остается невозмущенным (рис. 2). В работе [Lazutin, 2016] этот эффект получил простое объяснение — дрейфовая оболочка в ослабленном вечернем магнитном поле адиабатически смещается на меньшие широты. Поскольку на многих рисунках поток электронов представлен в зависимости от *L*-координаты, вычисленной для спокойного уровня магнитной активности,

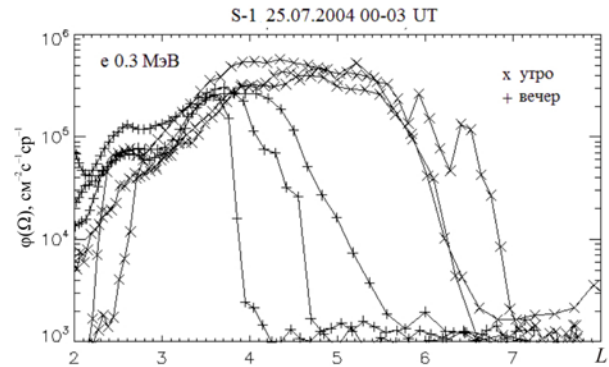


Рис. 2. Шесть последовательных электронных профилей, зарегистрированных на вечерней и утренней стороне спутником SERVIS-1 в канале 0.3 МэВ на главной фазе магнитной бури 25.07.2004

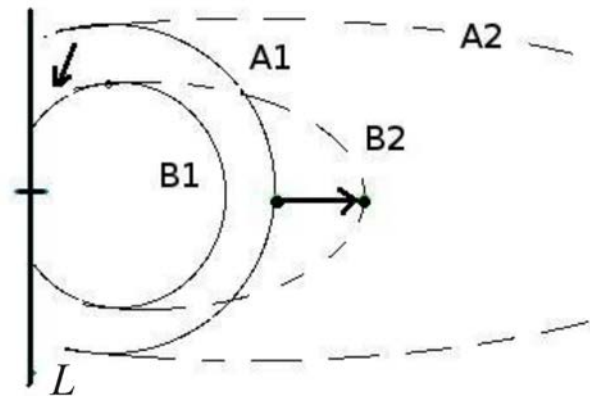


Рис. 3. На главной фазе бури силовые линии A1 и B1 трансформируются в A2 и B2. Дрейфовые орбиты частиц переходят (по стрелкам) от A1 на B2, на экваторе — от Земли и к более низким широтам — у основания силовых линий

а не для соответствующих моментов бури, можно рассматривать представленную картину как результат смещения дрейфовой оболочки к Земле.

Возникает кажущееся противоречие: вследствие *Dst*-эффекта дрейфовая оболочка уходит от Земли, а согласно только что изложенным соображениям она приближается к Земле. Что это — два разных адиабатических эффекта? Но так быть не должно. Объяснение противоречия приведено на рис. 3. Изменение магнитного поля на главной фазе магнитной бури действительно сдвигает дрейфовую оболочку на экваторе от Земли, но на малых высотах, вблизи основания силовой линии, из-за ее новой формы сдвиг дрейфовой оболочки происходит к более низким широтам.

Рассмотрим механизмы потерь и ускорений, работающие во время бури. Начнем с взаимодействия с волнами, которое может привести и к снижению, и к возрастанию потока энергичных электронов.

### ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОНОВ С ВЫСОКОЧАСТОТНЫМИ ВОЛНАМИ

Энергичные электроны могут эффективно взаимодействовать с плазменными шипениями внутри плазмосферы и с ОНЧ-излучением выше плазмо-

паузы. Взаимодействие приводит к диффузии и по питч-углам, и в пространстве скоростей, в результате чего происходят как сброс частиц в атмосферу и падение интенсивности потока, так и ускорение частиц, рост интенсивности потока и энергии электронов. Гирорезонанс частиц с учетом эффекта Доплера с волнами различных типов в диапазоне от 0.1 до единиц гирочастоты электрона, описанный в работах [Horne, Thorne, 1998; 2003], исследовался также в многочисленных работах экспериментальной и теоретической направленности.

Изменения энергии и питч-угла частицы под действием резонанса с цугами ОНЧ-излучения вызывают блуждание частицы по питч-углам, что в итоге приводит к ее сбросу в конус потерь и гибели в атмосфере. Гибель электронов в атмосфере при взаимодействии с ОНЧ-излучением исследовалась в ряде теоретических работ (например, [Shprits et al., 2008b]) и подробно описана в работах, основанных на измерениях, причем в некоторых из них гибель в атмосфере рассматривается в качестве главного механизма, вызывающего падение потока электронов после бури [Захаров, Кузнецов, 1978; Summers et al., 2004; Meredith et al., 2007; Xiao et al., 2014].

В других статьях демонстрируется значимость питч-угловой диффузии по скоростям для возрастных потоков электронов [Summers et al., 1998; Horne et al., 2005; Демехов и др., 2006; Foster et al., 2017]. Ускорение до энергий порядка 1 МэВ наблюдается в РП с максимумом на  $L \sim 4-7$ . Условием эффективного роста потока электронов является высокая суббуревая активность, в результате которой появляются свежееускоренные электроны с энергией 20–100 кэВ, выходящие в качестве исходного потока, и наблюдается большая мощность хоровых излучений.

Релятивистские электроны ускоряются за счет паразитной диффузии на волнах, генерированных менее энергичными электронами. Такое двухступенчатое ускорение описано, например, в работах [Jaynes et al., 2015; Foster et al., 2017].

По оценкам [Summers et al., 2004], характерное время ускорений и потерь примерно одинаково и составляет около суток, но сильно варьирует в зависимости от параметров среды.

Экзотическим, но тем не менее реальным является процесс сброса электронов из-за паразитного резонанса с электромагнитными ионно-циклотронными (ЕМИС) волнами [Summers, Thorne, 2003; Лазутин и др., 2011; Ni et al., 2015; Kubota, Omura, 2017]. ЕМИС-волны создаются протонами кольцевого тока на главной фазе бури. Поскольку циклотронная частота протонов намного меньше циклотронной частоты электронов, взаимодействие происходит вследствие доплеровского смещения частоты при встречном движении волны и частицы. При этом продольная скорость электрона должна быть очень большой, и в результате наблюдается сброс только электронов с энергией несколько МэВ.

## ПОТЕРИ НА МАГНИТОПАУЗЕ

Достаточно убедительные аргументы в пользу механизма гибели электронов на магнитопаузе приводились в работах [Dmitriev, Chao, 2003; Shprits et

al., 2006; Millan, Thorne, 2007; Kim et al., 2008; Saito et al., 2010; Matsumura et al., 2011; Turner et al., 2012; Hudson et al., 2014; Lazutin, 2016]. В области квазизахвата дрейфовые оболочки не замкнуты, на ночной стороне электроны дрейфуют с сохранением адиабатических инвариантов до утренней, протоны — до вечерней границы магнитосферы — магнитопаузы (на дневной стороне наоборот), после чего уходят с замкнутых силовых линий в турбулентный магнитослой. Этот непрерывный процесс истечения электронов из РП усиливается на главной фазе магнитной бури, когда *Dst*-эффект сдвигает дрейфовые оболочки электронов от Земли [Reeves et al., 2003]. Кроме того, магнитные бури часто сопровождаются резкими возрастаниями плотности и скорости плазмы солнечного ветра, что приводит к быстрому сдвигу магнитопаузы к Земле и усилению потерь электронов из внешней магнитосферы [Dmitriev, Chao, 2003].

Вследствие питч-угловой диффузии небольшая часть электронов (несколько процентов) может вернуться из магнитослоя на дрейфовые орбиты, о чем свидетельствует так называемый эффект дрейфового эха [Vampola, Korth, 1992], однако большая часть частиц уходит в хвост магнитосферы [Дайбог и др., 2015] и в межпланетное пространство.

В результате область квазизахвата должна быстро опустеть, однако, как видно по измерениям на геостационарной орбите (см., например, рис. 4), она не пустеет благодаря прежде всего встречному процессу ускорения, а при отсутствии оно — благодаря диффузии частиц из области максимума пояса — области более близкой к Земле, обратной радиальной диффузии от Земли. Радиальная диффузия из области с большим потоком частиц в область с меньшим описана, например, в [Shprits et al., 2006]. В результате концентрация электронов в РП уменьшается, если, конечно, нет пополнения вследствие ускорения частиц. Интервалы медленного спада интенсивности потоков электронов видны на рис. 4, причем в эти временные интервалы  $K_p$ -индекс низкий, суббуревая активность отсутствует. В остальное время пополнение популяции электронов за счет суббуревой активности маскирует этот процесс.

## ПРОЦЕССЫ УСКОРЕНИЯ. МЕДЛЕННЫЙ ЕХВ-ДРЕЙФ

Существует большое разнообразие механизмов ускорения энергичных электронов в магнитосфере. Выше уже говорилось, что ускорение электронов может происходить при резонансе с ОНЧ-волнами. Наряду с циклотронным резонансом можно ожидать возникновения дрейфового резонанса с пульсациями типа Pc5 магнитосферного происхождения или пульсациями в солнечном ветре с периодом порядка нескольких минут. Об ускорении такого типа говорится, в частности, в работах [Elkington et al., 1999; Ukhorskiy et al., 2006]. Более быстро и эффективно работает ускорение электронов вследствие радиального электрического дрейфа или заброса в область более сильного магнитного поля. Крупномасштабное электрическое поле своим происхождением обязано солнечному ветру. В индексе Акасофу, отража-

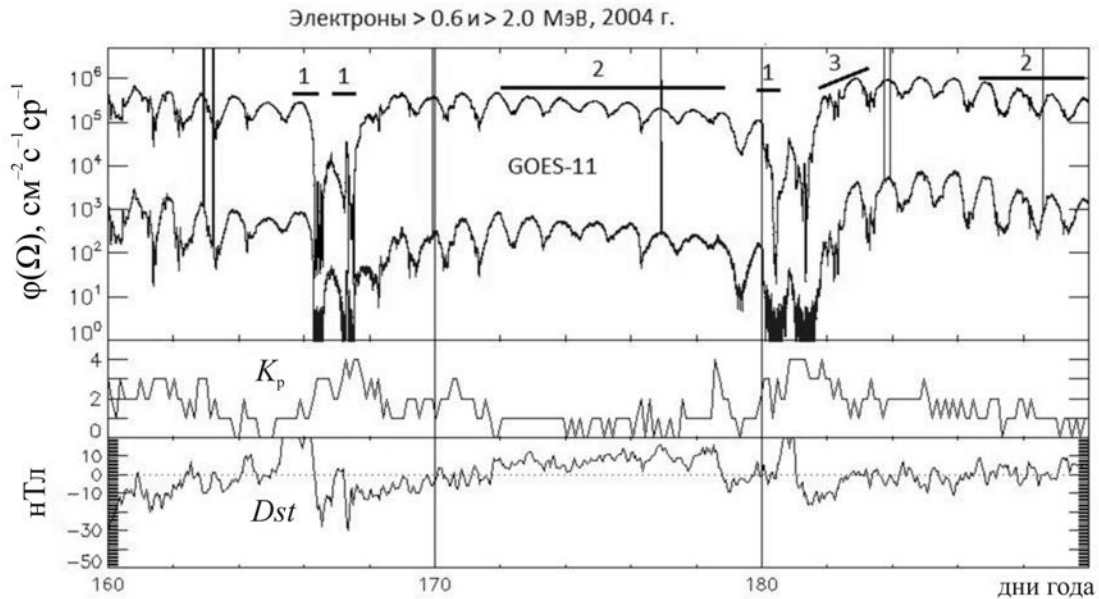


Рис. 4. Поток электронов и индексы магнитной активности (умеренные возмущения): «синусоидальные» вариации потока электронов — проявление асимметрии день—ночь магнитного поля магнитосферы; 1 — спад потока электронов на главной фазе бури, 2 — потери электронов на магнитопаузе, 3 — рост потока вследствие радиального дрейфа из центра РП

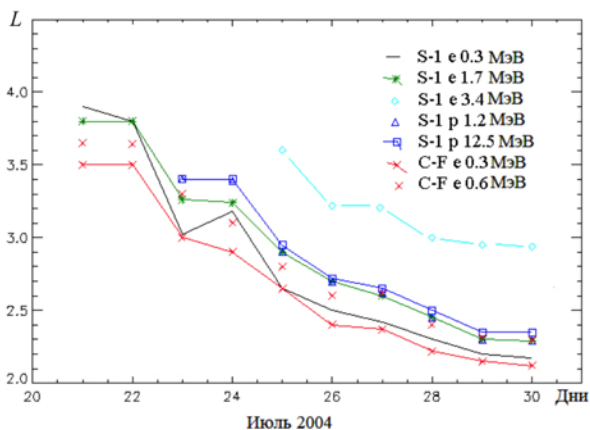


Рис. 5. Сдвиг низкоширотного склона РП к Земле во время цепочки магнитных бурь в июле 2004 г.

ющем эффективность воздействия солнечного ветра на магнитосферу Земли, присутствуют скорость и величина вертикальной составляющей межпланетного магнитного поля.

Направленное с утра на вечер крупномасштабное конвективное электрическое поле раскручивает конвективный вихрь в хвосте магнитосферы. Проникает это поле и в авроральную магнитосферу, и во внешний РП, благодаря ему частицы РП ускоряются электрическим дрейфом, о чем имеется достаточно много свидетельств [Tverskaya et al., 2005; Califf et al., 2017; Claudepierre et al., 2017; Millan, Baker, 2012; Turner et al., 2017]. В работе [Califf et al., 2017] утверждается, что  $E \times V$ -дрейф эффективен до энергий 500 кэВ, тогда как для электронов больших энергий надо учитывать дополнительные механизмы. Правда, авторы этой работы в качестве исходного источника рассматривают электроны плазменного слоя хвоста магнитосферы, энергия которых на два порядка меньше энергии суббуравых авроральных

электронов. Особенно мощное ускорение и сохраняющийся на много дней повышенный поток частиц наблюдаются в результате цепочек следующих одна за другой магнитных бурь. Такой необычный случай описан в работах [Kuznetsov et al., 2009; Yang et al., 2014]. По данным первой из них мы показываем на рис. 5, как сдвигается низкоширотная граница захваченных в РП электронов и протонов (в эти дни РП был заполнен солнечными протонами). Сдвиг к Земле происходит под действием  $E \times V$ -дрейфа, что подтверждается одинаковой скоростью для частиц всех энергий и типов.

Сдвигаясь в область более высокой напряженности магнитного поля, частицы увеличивают энергию, что вызывает рост потока частиц. Рисунок 6 [Лазутин и др., 2012] показывает, что РП долго освобождается от такого переполнения. Заметим, что сильные бури могут приводить к образованию дополнительных поясов энергичных электронов в районе провала, которые также существуют месяцами [Вернов и др., 1965; Кузнецов, 1966; Логачев, Лазутин, 2012].

## ПРОЦЕССЫ УСКОРЕНИЯ. ИМПУЛЬСНЫЙ $E \times V$ -ЗАБРОС

Электрическое поле может быть также кратковременным, индукционным, вызванным быстрым изменением магнитного поля в момент SC или суббуравой активизации. Заброс электронов и протонов импульсом SC вглубь РП, обнаруженный при измерениях на спутнике CRRES [Li et al., 1993] 24 марта 1991 г., проанализирован в работе [Павлов и др., 1993]. Импульс SC двойной — вслед за положительным импульсом следует отрицательный, поэтому, если частицы не успеют перенестись магнитным дрейфом на ночную сторону, возрастание их энергии

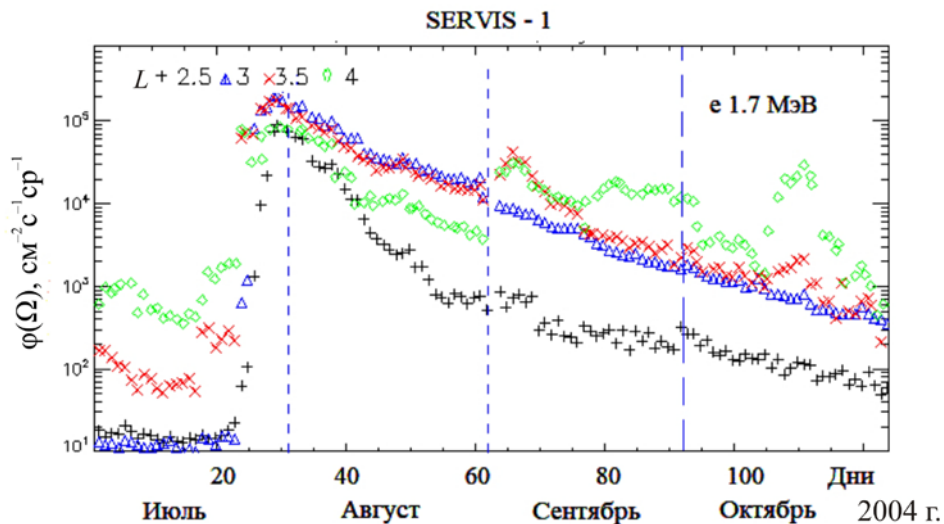


Рис. 6. Релаксация избыточного потока электронов после июльских бурь 2004 г.

(и интенсивности потока) будет ликвидировано адиабатически. Частицы же, полупериод дрейфа которых составляет 1–3 мин, перейдут на ночную сторону и там тоже испытают радиальный дрейф с ускорением под действием отрицательного импульса. Тем самым устанавливается нижний предел энергий частиц, для которых механизм будет работать, — порядка нескольких МэВ. Если учесть, что большие импульсы SC (от 50 нТл и выше) происходят не чаще двух раз в год, заброс электронов с энергией несколько МэВ импульсом SC на большую глубину не играет существенной роли в динамике РП.

Гораздо чаще имеет место импульсная диполизация магнитного поля в момент брейкапа или повторной активизации суббури. Она приводит к тому, что наряду с возрастанием потока электронов низких (до нескольких кэВ) энергий, ответственными за вспышки полярных сияний и ускоряемых продольным электрическим полем, в авроральной магнитосфере наблюдается импульсное возрастание потока энергичных электронов. Характеристики этих возрастных хорошо и давно изучены и по аэростатным [Anderson, 1965], и по спутниковым наблюдениям, в частности по измерениям на спутнике CREES в экваториальной плоскости. Как правило, эти электроны появляются в области квазизахвата, имеют энергию в диапазоне 20–200 кэВ и являются причиной последующего ускорения радиальным  $\mathbf{E} \times \mathbf{V}$ -дрейфом, о котором говорилось выше [Tang et al., 2016].

Вместе с тем во время магнитных бурь, когда область суббуревых активизаций смещается к Земле, суббуревой импульс электрического поля забрасывает электроны в центр РП, в область большой напряженности магнитного поля, и предельная энергия свежееускоренных электронов может достигать нескольких МэВ [Лазутин, 2013]. В результате увеличивается градиент потока электронов на внешнем склоне РП и в области квазизахвата наблюдается медленный рост потока частиц за счет дрейфа наружу. Ускорение электронов через суббуревой заброс рассматривалось также в работах [Kabin et al., 2017; Gabrielse et al., 2016, 2017].

Нишида [Nishida, 1976] выдвинул идею «рециркуляции» электронов, согласно которой электроны, единожды ускоряясь при электрическом дрейфе, вновь переходят на более далекую силовую линию и так ускоряются многократно. Идея, выдвинутая для магнитосферы Юпитера, нашла сторонников, применивших ее для земной магнитосферы [Baker et al., 1997].

В работе [Zhenpeng Su et al., 2014] подчеркивается различие между субрелятивистскими ( $<0.1$  МэВ) и релятивистскими (2–5 МэВ) электронами: первые обеспечивают до 100 % возрастных потоков за счет заброса вглубь РП, вторые лишь 20 %, при этом возрастание происходит за несколько минут. По расчету, взаимодействие с хорами обуславливает 60–80 % возрастных потоков энергичных (0.2–5.0 МэВ) электронов, происходящих за более длительное время — ~6 ч. Аналогичную разницу в поведении электронов разных энергий выявил статистический анализ в работе [Ying Xiong et al., 2015]: поток энергичных электронов с энергией 0.3–2.5 МэВ возрастает во время 87 % бурь, тогда как поток электронов с энергией 2.5–14 МэВ только в 35 % бурь.

## РАДИАЛЬНЫЙ ПЕРЕНОС

Радиальный перенос, заброс, инжекция, диффузия — названий и механизмов довольно много, и чтобы не запутаться самим и не запутать читателей, изложенное выше перечислим коротко.

К Земле поток частиц переносится с ускорением импульсной суббуревой инжекцией и  $\mathbf{E} \times \mathbf{V}$ -дрейфом в крупномасштабном электрическом поле во время магнитной бури, радиальной диффузией на волнах и на магнитных импульсах. Последний механизм (самый медленный, согласно [Тверской, 2004]) ответственен за формирование электронного радиационного пояса.

По окончании главной фазы бури наблюдается возвратный адиабатический перенос к Земле.

Кроме того, и во время бури, и в спокойный период наблюдается непрерывный поток электронов от Земли в результате дрейфа из-за отрицательного радиального градиента захваченных частиц.

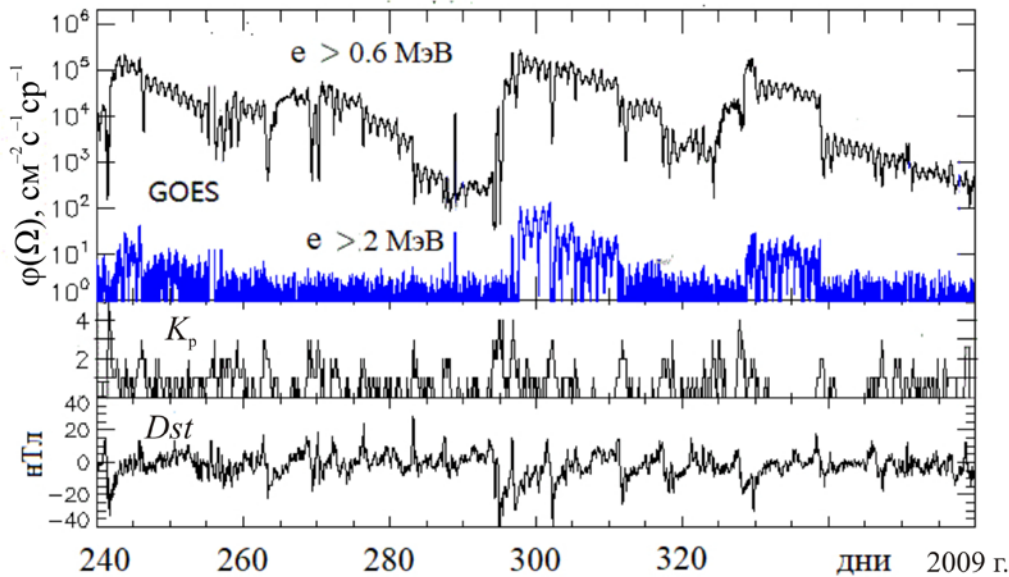


Рис. 7. Поток электронов в двух энергетических каналах, измеренный на геостационарном спутнике GOES-11, и индексы магнитной активности (последняя четверть 2009 г.)

### СПОКОЙНАЯ МАГНИТОСФЕРА

Чередование перечисленных выше процессов приводит к тому, что внешний электронный радиационный пояс все время «дышит», причем меняется не только интенсивность потоков его населяющих частиц, но и размеры самого РП. Наиболее отчетливо видны эти вариации в зоне квазизахвата.

Пример измерений потоков электронов на геостационарном спутнике вместе с индексами магнитной активности приведен на рис. 4, на котором мы отметили несколько характерных вариаций потоков электронов. Быстрая квазигармоническая вариация с периодом 24 ч (период обращения спутника) связана с асимметрией магнитосферы день—ночь. Помимо быстрого адиабатического падения интенсивности потока электронов на главной фазе бури (1), мы видим интервалы с медленным падением интенсивности (2) в периоды низкой суббуревой активности и, наоборот, ее медленного роста (3), который не стимулируется сиоми минутной активностью, но является следствием градиентного радиального дрейфа наружу из более глубоких областей РП (3).

Как правило, эти вариации кратковременны, спады интенсивности потока компенсируются возрастаниями и на масштабах порядка месяца стабильность РП сохраняется. Вместе с тем возможны и долговременные опустошения РП, о которых говорилось в ряде работ. Так, в работе [Jaunes et al., 2014] долговременное понижение потока электронов РП объясняется тем, что в спокойный период, когда нет ускорения, все определяют потери за счет высыпания электронов 700 кэВ – 2 МэВ (до 92 % и более). В работе [Ukhorskiy et al., 2015], напротив, отмечается, что потери на магнитопаузе отвечают за большую часть потерь на  $L > 5$ , тогда как на меньших  $L$  спад адиабатический. Даже в годы минимума солнечной активности уровень магнитных возмущений остается достаточным, чтобы замаскировать этот процесс опустошения внешнего РП, и только в особенно

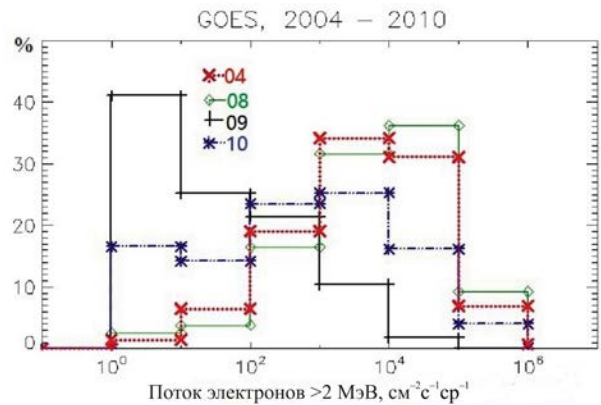


Рис. 8. Распределение уровней потока электронов в годы максимальной (2004 г.) и минимальной (2008–2010 гг.) активности

глубоком минимуме 2009 г. наблюдалось существенное опустошение [Kataoka, Miyoshi, 2010; Li et al., 2011; Lee et al., 2013; Lazutin, 2017]. Магнитная активность в эти годы действительно была очень низкой, как следует из распределения числа дней с высоким и низким значением  $K_p$ -индекса.

Из рис. 7 видно, что интервалов медленного понижения потока электронов стало намного больше, и они, естественно, совпадают с периодами низкой суббуревой активности. Наконец, опустошение РП обнаруживается при сравнении гистограмм распределения дней с разными уровнями потока электронов в 2009 г. с годами более высокой магнитной активности (рис. 8). Мы говорим об опустошении всего РП, поскольку понижение потока частиц на периферии РП приводит, вследствие диффузии, к опустошению РП в целом.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В свободное от магнитных возмущений (суббурь) время внешний электронный радиационный пояс постепенно опустошается. Процесс этот разви-

вается на внутренних оболочках РП вследствие сброса частиц в атмосферу и в зоне квазизахвата из-за того, что дрейфовые оболочки электронов там не замкнуты, что приводит к потерям на магнитопаузе. Область квазизахвата опустошается не сразу благодаря радиальной диффузии частиц наружу из центра РП. Процесс опустошения мало заметен в обычные годы вследствие пополнения свежееускоренными частицами, но в годы экстремально низкой активности приводит к существенному понижению численности электронной популяции РП.

На главной фазе магнитной бури основной причиной понижения интенсивности потоков электронов является адиабатическое охлаждение, связанное с сохранением адиабатических инвариантов. Дополнительной причиной является сброс электронов из РП в атмосферу и на магнитопаузу. В результате интенсивность потоков электронов в РП понижается. На графиках измерений на низковысотных спутниках часто используется  $L$ -координата, вычисленная для невозмущенной конфигурации магнитного поля магнитосферы. В этих случаях надо помнить, что такое представление не отражает реальную дрейфовую траекторию.

Степень восстановления потока электронов после бури определяется соотношением возрастных и потерь, и значения потока составляют непрерывный ряд от низкого до сильно повышенного.

Возрастания потока электронов складываются из следующих процессов:

- Быстрый  $E \times B$ -заброс электронов, сопровождаемый ростом энергии, глубоко к Земле импульсным индукционным электрическим полем суббулевой активизации во время магнитной бури.

- Этот всплеск интенсивности потока авральных электронов служит основой для второго, более медленного возрастания потока электронов в РП в результате электрической инжекции к Земле крупномасштабным электрическим полем солнечного ветра. Цепочка из нескольких бурь иногда может увеличить на несколько порядков поток электронов, и это переполнение РП может рассеиваться месяцами. Кроме того, возможно появление дополнительных РП в районе провала.

На периферии РП, в области квазизахвата, возрастание потоков частиц обеспечивается обратным от Земли дрейфом энергичных электронов, который пополняет с задержкой 2–3 сут область квазизахвата (геостационарную область).

Падение интенсивности потоков электронов в РП происходит преимущественно в результате потерь на магнитопаузе, которые усиливаются на главной фазе бури из-за адиабатического выноса дрейфовых оболочек и в периоды низкой суббулевой активности. Во время экстремально низкой активности 2009 г. этот механизм привел к существенным потерям частиц РП.

Резонанс электронов (циклотронный, дрейфовый) с ОНЧ-излучением и пульсациями приводит как к их питч-угловой диффузии в конус потерь и гибели в атмосфере, так и к возрастанию потока энергичных электронов при паразитном резонансе на излучении, создаваемом большим потоком менее энергичных частиц.

Сочетание этих механизмов потерь и возрастных создает индивидуальный характер развития радиационного пояса во время каждой магнитной бури.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бахарева М.Ф. Нестационарное статистическое ускорение релятивистских частиц и его роль во время геомагнитных бурь // Геомагнетизм и аэрономия. 2003. Т. 43, № 6. С. 737–744.

Вернов С.Н., Чудаков А.Е., Вакулов П.В. и др. Результаты исследования геометрического расположения и состава частиц радиационных поясов по данным спутников «Электрон-1» и «Электрон-2» // Исследование космического пространства. М.: Наука, 1965. С. 394–405.

Дайбог Е.И., Кечкемети К., Лазутин Л.Л. и др. Релятивистские электроны в хвосте магнитосферы Земли в минимумах солнечной активности // Изв. РАН. Сер. физическая. 2015. Т. 79, № 5. С. 701–703. DOI: [10.7868/S0367676515050191](https://doi.org/10.7868/S0367676515050191).

Демехов А.Г., Трахтенгерц В.Ю., Райкрофт М.Д., Нанн Д. Ускорение электронов в магнитосфере свистовыми волнами различной частоты // Геомагнетизм и аэрономия. 2006. Т. 46, № 6. С. 711–716.

Захаров А.В., Кузнецов С.Н. Высыпание электронов и ОНЧ-излучение // Геомагнетизм и аэрономия. 1978. Т. 18, № 2. С. 352–353.

Иванова Т.А., Павлов Н.Н., Рейзман С.Я. и др. Динамика внешнего радиационного пояса релятивистских электронов в минимуме солнечной активности // Геомагнетизм и аэрономия. 2000. Т. 40, № 1. С. 13–18.

Калегав В.В., Власова Н.А., Пенг Ж. Динамика магнитосферы во время геомагнитных бурь 21–22.I.2005 и 14–15.XII.2006 // Космические исследования. 2015. Т. 53, № 2. С. 105–117. DOI: [10.7868/S002342061502003X](https://doi.org/10.7868/S002342061502003X).

Кузнецов С.Н. Поведение внешнего радиационного пояса Земли по данным спутников «Электрон-1» и «Электрон-2» // Изв. АН. Сер. физическая. 1966. Т. 30, № 11. С. 1829–1837.

Лазутин Л.Л. Инжекция релятивистских электронов во внутреннюю магнитосферу во время магнитных бурь: связь с суббурами // Геомагнетизм и аэрономия. 2013. Т. 53, № 6. С. 762–778. DOI: [10.7868/S0016794013050118](https://doi.org/10.7868/S0016794013050118).

Лазутин Л.Л., Панасюк М.И., Хасебе Н. Ускорение и потери энергичных протонов и электронов во время магнитной бури 30–31 августа 2004 г. // Космические исследования. 2011. Т. 49, № 1. С. 38–44.

Лазутин Л.Л., Логачев Ю.И., Муравьева Е.А., Петров В.Л. Релаксация структуры протонного и электронного радиационных поясов Земли после сильных магнитных бурь // Космические исследования. 2012. Т. 50, № 1. С. 3–14.

Логачев Ю.И., Лазутин Л.Л. О поясе энергичных электронов на  $L=2.75$  в магнитосфере Земли // Космические исследования. 2012. Т. 50, № 2. С. 122–129.

Павлов Н.Н., Тверская Л.В., Тверской Б.А., Чучков Е.А. Изменения потока частиц радиационных поясов во время сильной магнитной бури 24 марта 1991 г. // Геомагнетизм и аэрономия. 1993. Т. 33, № 6. С. 41–45.

Потапов А.С. Релятивистские электроны внешнего радиационного пояса и методы их предсказания (обзор) // Солнечно-земная физика. 2017. Т. 3, № 1. С. 46–58. DOI: [10.12737/22210](https://doi.org/10.12737/22210).

Тверской Б.А. Динамика радиационных поясов Земли // Геомагнетизм и аэрономия. 1964. Т. 4. С. 436–448.

Тверской Б.А. Перенос и ускорение заряженных частиц в магнитосфере Земли // Геомагнетизм и аэрономия. 1965. Т. 5. С. 793–809.

Тверской Б.А. Основы теоретической космофизики. М.: УРСС, 2004. 376 с.

Anderson K.A. Balloon measurements of X rays in the auroral zone // Auroral Phenomena / Ed. M. Walt. Stanford University Press, Stanford, California, 1965. P. 46–83.



- Antonova E.E. Magnetospheric substorms and the sources of inner magnetosphere particle acceleration // *The Inner Magnetosphere: Physics and Modeling*. 2005. P. 105–111. (Geophysical Monograph Ser. V. 155). DOI: [10.1029/155GM12](https://doi.org/10.1029/155GM12).
- Baker D.N., Li X., Turner N., et al. Recurrent geomagnetic storms and relativistic electron enhancements in the outer magnetosphere: ISTP coordinated measurements // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102. P. 14,141–14,148. DOI: [10.1029/97JA00565](https://doi.org/10.1029/97JA00565).
- Califf S., Li X., Zhao H. The role of the convection electric field in filling the slot region between the inner and outer radiation belts // *J. Geophys. Res.* 2017. V. 122. P. 2051–2068. DOI: [10.1002/2016JA023657](https://doi.org/10.1002/2016JA023657).
- Claudepierre S.G., Reeves G.D., O'Brien T.P., et al. The hidden dynamics of relativistic electrons (0.7–1.5 MeV) in the inner zone and slot region // *J. Geophys. Res.* 2017. V. 122. P. 3127–3144. DOI: [10.1002/2016JA023719](https://doi.org/10.1002/2016JA023719).
- Dmitriev A.V., Chao J.-K. Dependence of geosynchronous relativistic electron enhancements on geomagnetic parameters // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. P. 1388. DOI: [10.1029/2002JA009664](https://doi.org/10.1029/2002JA009664).
- Dmitriev A.V., Jayachandran P.T., Tsai L.-C. Elliptical model of cutoff boundaries for the solar energetic particles measured by POES satellites in December 2006 // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. A12244. DOI: [10.1029/2010JA015380](https://doi.org/10.1029/2010JA015380).
- Dmitriev A.V., Suvorova A.V., Chao J.K., et al. Anomalous dynamics of the extremely compressed magnetosphere during 21 January 2005 magnetic storm // *J. Geophys. Res.* 2014. V. 119. iss. 2. P. 877–896. DOI: [10.1002/2013JA019534](https://doi.org/10.1002/2013JA019534).
- 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.* 1999. V. 26, iss. 21. P. 3273–3276. DOI: [10.1029/1999GL003659](https://doi.org/10.1029/1999GL003659).
- Foster J.C., Erickson P.J., Omura Y., et al. Van Allen Probes observations of prompt MeV radiation belt electron acceleration in nonlinear interactions with VLF chorus // *J. Geophys. Res.* 2017. V. 122. P. 324–339. DOI: [10.1002/2016JA023429](https://doi.org/10.1002/2016JA023429).
- Friedel R.H.W., Reeves G.D., Obara T. Relativistic electron dynamics in the inner magnetosphere — a review // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2002. V. 64, iss. 2. P. 265–282. DOI: [https://dx.doi.org/10.1016/S1364-6826\(01\)00088-8](https://dx.doi.org/10.1016/S1364-6826(01)00088-8).
- Gabrielse C., Harris C., Angelopoulos V., et al. The role of localized inductive electric fields in electron injections around dipolarizing flux bundles // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2016. V. 121. P. 9560–9585. DOI: [10.1002/2016JA023061](https://doi.org/10.1002/2016JA023061).
- Gabrielse C., Angelopoulos V., Harris C., et al. Extensive electron transport and energization via multiple, localized dipolarizing flux bundles // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2017. V. 122. P. 5059–5076. DOI: [10.1002/2017JA023981](https://doi.org/10.1002/2017JA023981).
- Horne R.B., Thorne R.M. Potential waves for relativistic electron scattering and stochastic acceleration during magnetic storms // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25, iss. 15. P. 3011–3014. DOI: [10.1029/98GL01002](https://doi.org/10.1029/98GL01002).
- Horne R.B., Thorne R.M. Relativistic electron acceleration and precipitation during resonant interactions with whistler mode chorus // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30, iss. 10. P. 1527. DOI: [10.1029/2003GL016973](https://doi.org/10.1029/2003GL016973).
- Horne R.B., Thorne R.M., Glauert S.A., et al. Timescale for radiation belt electron acceleration by whistler mode chorus waves // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110, A03225. DOI: [10.1029/2004JA010811](https://doi.org/10.1029/2004JA010811).
- Hudson M.K., Baker D.N., Goldstein J., et al. Simulated magnetopause losses and Van Allen Probe flux dropouts // *Geophys. Res. Lett.* 2014. V. 41. P. 1113–1118. DOI: [10.1002/2014GL059222](https://doi.org/10.1002/2014GL059222).
- Hwang J., Choi E.-J., Park J.-S., et al. Comprehensive analysis of the flux dropout during 7–8 November 2008 storm using multisatellite observations and RBE model // *J. Geophys. Res.* 2015. V. 120, iss. 6. P. 4298–4312. DOI: [10.1002/2015JA021085](https://doi.org/10.1002/2015JA021085).
- Jaynes A.N., Li X., Schiller Q.G., et al. Evolution of relativistic outer belt electrons during an extended quiescent period // *J. Geophys. Res.* 2014. V. 119, iss. 12. P. 9558–9566. DOI: [10.1002/2014JA020125](https://doi.org/10.1002/2014JA020125).
- Jaynes A.N., Baker D.N., Singer H.J., et al. Source and seed populations for relativistic electrons: their roles in radiation belt changes // *J. Geophys. Res.* 2015. V. 120, iss. 9. P. 7240–7254. DOI: [10.1002/2015JA021234](https://doi.org/10.1002/2015JA021234).
- Kabin K., Kalugin G., Donovan E., Spanswick E. Particle energization by a substorm dipolarization // *J. Geophys. Res.* 2017. V. 122. P. 349–367. DOI: [10.1002/2016JA023459](https://doi.org/10.1002/2016JA023459).
- Kalegaev V.V., Vlasova N.A. The Earth's magnetosphere response to interplanetary medium conditions on January 21–22, 2005 and on December 14–15, 2006 // *Adv. Space Res.* 2014. V. 54. P. 517–527. DOI: [10.1016/j.asr.2013.11.015](https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.11.015).
- Kataoka R., Miyoshi Y. Why are relativistic electrons persistently quiet at geosynchronous orbit in 2009? // *Space Weather*. 2010. V. 8, S08002. DOI: [10.1029/2010SW000571](https://doi.org/10.1029/2010SW000571).
- Kim H.J., Chan A.A. Fully adiabatic changes in stormtime relativistic electron fluxes // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102. P. 22,107. DOI: [10.1029/97JA01814](https://doi.org/10.1029/97JA01814).
- Kim K.C., Lee D.-Y., Kim H.-J., et al. Numerical calculations of relativistic electron drift loss effect // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113, A09212. DOI: [10.1029/2007JA013011](https://doi.org/10.1029/2007JA013011).
- Kubota Y., Omura Y. Rapid precipitation of radiation belt electrons induced by EMIC rising tone emissions localized in longitude inside and outside the plasmapause // *J. Geophys. Res.* 2017. V. 122. P. 293–309. DOI: [10.1002/2016JA023267](https://doi.org/10.1002/2016JA023267).
- Kuznetsov S.N., Lazutin L.L., Panasyuk M.I., et al. Solar particle dynamics during magnetic storms of July 23–27, 2004 // *Adv. Space Res.* 2009. V. 43, iss. 4. P. 553–558. DOI: [10.1016/j.asr.2008.09.014](https://doi.org/10.1016/j.asr.2008.09.014).
- Lazutin L.L. On radiation belt dynamics during magnetic storm // *Adv. Space Res.* 2012. V. 49, iss. 2. P. 302–315. DOI: [10.1016/j.asr.2011.09.015](https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.09.015).
- Lazutin L.L. Dawn–dusk asymmetry and adiabatic dynamic of the radiation belt electrons during magnetic storm // *Adv. Space Res.* 2016. V. 58, iss. 6. P. 897–902. DOI: [10.1016/j.asr.2016.05.047](https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.05.047).
- Lazutin L.L. Depletion of the outer radiation belt during low activity years // *Adv. Space Res.* 2017. V. 59, iss. 9. P. 2248–2254. DOI: [10.1016/j.asr.2017.02.008](https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.02.008).
- Lee D.-Y., Shin D.-K., Kim J.-H., et al. Long-term loss and reformation of the outer radiation belt // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2013. V. 118. P. 3297–3313. DOI: [10.1002/jgra.50357](https://doi.org/10.1002/jgra.50357).
- Li X., Roth I., Temerin M., et al. Simulations of the prompt energization and transport of radiation belt particles during the March 24, 1991 SSC // *Geophys. Res. Lett.* 1993. V. 20. P. 2423.
- Li X., Baker D.N., Temerin M., et al. Multisatellite observations of the outer zone electron variation during the November 3–4, 1993, magnetic storm // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102, iss. A7. P. 14,123–14,140. DOI: [10.1029/97JA01101](https://doi.org/10.1029/97JA01101).
- Li X., Temerin M., Baker D.N., et al. Quantitative prediction of radiation belt electrons at geostationary orbit based on solar wind measurements // *Geophys. Res. Lett.* 2001. V. 28, iss. 9. P. 1887–1890. DOI: [10.1029/2000GL012681](https://doi.org/10.1029/2000GL012681).
- Li X., Temerin M., Baker D.N., Reeves G.D. Behavior of MeV electrons at geosynchronous orbit during last two solar cycles // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116, A11207. DOI: [10.1029/2011JA016934](https://doi.org/10.1029/2011JA016934).
- Matsumura C., Miyoshi Y., Seki K., et al. Outer radiation belt boundary location relative to the magnetopause: implications for magnetopause shadowing // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116, A06212. DOI: [10.1029/2011JA016575](https://doi.org/10.1029/2011JA016575).
- McIlwain C.E. Ring current effects on trapped particles // *J. Geophys. Res.* 1966. V. 71. P. 3623.
- Meredith N.P., Horne R.B., Glauert S.A., Anderson R.R. Slot region electron loss timescales due to plasmaspheric hiss and

lightning generated whistlers // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112, A08214. DOI: [10.1029/2007JA012413](https://doi.org/10.1029/2007JA012413).

Millan R.M., Baker D.N. Acceleration of particles to high energies in Earth's radiation belts // *Space Sci. Rev.* 2012. V. 173, iss. 1–4. P. 103–131. DOI: [10.1007/s11214-012-9941-x](https://doi.org/10.1007/s11214-012-9941-x).

Millan R.M., Thorne R.M. Review of radiation belt relativistic electron losses // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2007. V. 69. P. 362–377. DOI: [10.1029/97JA01101](https://doi.org/10.1029/97JA01101).

Ni B., Xing Cao, Zhengyang Zou. Resonant scattering of outer zone relativistic electrons by multiband EMIC waves and resultant electron loss time scales // *J. Geophys. Res.* 2015. V. 120, iss. 9. P. 7357–7373. DOI: [10.1002/2015JA021466](https://doi.org/10.1002/2015JA021466).

Nishida A. Outward diffusion of energetic particles from the Jovian radiation belt // *J. Geophys. Res.* 1976. V. 81. P. 1771.

Parks G.K., Winkler J.R. Acceleration of energetic electrons observed at the synchronous altitude during magnetospheric substorms // *J. Geophys. Res.* 1968. V. 73. P. 5786.

Reeves G.D., Baker D.N., Belian R.D., et al. The global response of relativistic radiation belt electrons to the January 1997 magnetic cloud // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25, iss. 17. P. 3265. DOI: [10.1029/98GL02509](https://doi.org/10.1029/98GL02509).

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.* 2003. V. 30, iss. 10. P. 1529. DOI: [10.1029/2002GL016513](https://doi.org/10.1029/2002GL016513).

Saito S., Miyoshi Y., Seki K. A split in the outer radiation belt by magnetopause shadowing: test particle simulations // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115, A08210. DOI: [10.1029/2009JA014738](https://doi.org/10.1029/2009JA014738).

Shprits Y.Y., Thorne R.M., Friedel R., et al. Outward radial diffusion driven by losses at magnetopause // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111, A11214. DOI: [10.1029/2006JA011657](https://doi.org/10.1029/2006JA011657).

Shprits Y.Y., Elkington S., Meredith N.P., Subbotin D.A. Review of modeling of losses and sources of relativistic electrons in the outer radiation belt I: radial transport // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2008a. V. 70, iss. 14. P. 1679–1693. DOI: [10.1016/j.jastp.2008.06.008](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2008.06.008).

Shprits Y.Y., Subbotin D.A., Meredith N.P., Elkington S. Review of modeling of losses and sources of relativistic electrons in the outer radiation belt II: local acceleration and losses // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2008b. V. 70, iss. 14. P. 1694–1713. DOI: [10.1016/j.jastp.2008.06.014](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2008.06.014).

Simms L.E., Engebretson M.J., Pilipenko V., et al. Empirical predictive models of daily relativistic electron flux at geostationary orbit: multiple regression analysis // *J. Geophys. Res.* 2016. V. 121. P. 3181–3197. DOI: [10.1002/2016JA022414](https://doi.org/10.1002/2016JA022414).

Slivka M., Kudela K., Kuznetsov S.N. Some aspects of relativistic electron fluxes dynamics in the outer radiation belt during magnetic storms // *Acta Physica Slovaca.* 2006. V. 56, N 2. P. 103–107.

Summers D., Thorne R.M. Relativistic electron pitch-angle scattering by electromagnetic ion cyclotron waves during geomagnetic storms // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108, N A4. P. 1143. DOI: [10.1029/2002JA009489](https://doi.org/10.1029/2002JA009489).

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.* 1998. V. 103, N A9. P. 20487–20500. DOI: [10.1029/98JA01740](https://doi.org/10.1029/98JA01740).

Summers D., Ma C., Mukai T. Competition between acceleration and loss mechanisms of relativistic electrons during geomagnetic storms // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109, A04221. DOI: [10.1029/2004JA010437](https://doi.org/10.1029/2004JA010437).

Tang C.L., Zhang J.-C., Reeves G.D., et al. Prompt enhancement of the Earth's outer radiation belt due to substorm electron injections // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2016. V. 121. P. 11,826–11,838. DOI: [10.1002/2016JA023550](https://doi.org/10.1002/2016JA023550).

Tverskaya L.V., Ivanova T.A., Pavlov N.N., et al. Storm-time formation of a relativistic electron belt and some relevant phenomena in other magnetospheric plasma domains // *Adv. Space Res.* 2005. V. 36. P. 2392–2400. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2003.09.071>.

Turner D.L., Shprits Y., Hartinger M., Angelopoulos V. Explaining sudden losses of outer radiation belt electrons during geomagnetic storms // *Nat. Phys.* 2012. V. 8. P. 208–212. DOI: [10.1038/nphys2185](https://doi.org/10.1038/nphys2185).

Turner D.L., O'Brien T.P., Fennell J.F., et al. Investigating the source of near-relativistic and relativistic electrons in Earth's inner radiation belt // *J. Geophys. Res.* 2017. V. 122. P. 695–710. DOI: [10.1002/2016JA023600](https://doi.org/10.1002/2016JA023600).

Ukhorskiy A.Y., Anderson B.J., Takahashi K., Tsyganenko N.A. The impact of ULF oscillations in solar wind dynamic pressure on the outer radiation belt electrons // *Geophys. Res. Lett.* 2006. V. 33, iss. 6, L06111. DOI: [10.1029/2005GL024380](https://doi.org/10.1029/2005GL024380).

Ukhorskiy A.Y., Sitnov M.I., Millan R.M., et al. Global storm time depletion of the outer electron belt // *J. Geophys. Res.* 2015. V. 120, iss. 4. P. 2543–2556. DOI: [10.1002/2014JA020645](https://doi.org/10.1002/2014JA020645).

Vampola A.L., Korth A. Electron drift echoes in the inner magnetosphere // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 19, iss. 6. P. 625–628.

Vernov S.N., Gorchakov E.V., Kuznetsov S.N., et al. Particle fluxes in the outer geomagnetic field // *Rev. Geophys.* 1969. V. 7, N 12. P. 257–280. DOI: [10.1029/92GL00121](https://doi.org/10.1029/92GL00121).

Xiao F., Chang Yang, Zhaoguo He, et al. Chorus acceleration of radiation belt relativistic electrons during March 2013 geomagnetic storm // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2014. V. 119. P. 3325–3332. DOI: [10.1002/2014JA019822](https://doi.org/10.1002/2014JA019822).

Yang X.C., Zhu G.W., Zhang X.X., et al. An unusual long-lived relativistic electron enhancement event excited by sequential CMEs // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2014. V. 119. P. 119. DOI: [10.1002/2014JA019797](https://doi.org/10.1002/2014JA019797).

Ying Xiong, Lun Xie, Zuyin Pu, et al. Responses of relativistic electron fluxes in the outer radiation belt to geomagnetic storms // *J. Geophys. Res.* 2015. V. 120, iss. 11. P. 9513–9523. DOI: [10.1002/2015JA021440](https://doi.org/10.1002/2015JA021440).

Yu J., Li L.Y., Cao J.B., et al. Multiple loss processes of relativistic electrons outside the heart of outer radiation belt during a storm sudden commencement // *J. Geophys. Res.* 2015. V. 120. P. 10,275–10,288. DOI: [10.1002/2015JA021460](https://doi.org/10.1002/2015JA021460).

Zhenpeng Su, Hui Zhu, Fuliang Xiao, et al. Quantifying the relative contributions of substorm injections and chorus waves to the rapid outward extension of electron radiation belt // *J. Geophys. Res.* 2014. V. 119, iss. 12. P. 10,023–10,040. DOI: [10.1002/2014JA020709](https://doi.org/10.1002/2014JA020709).

## REFERENCES

Anderson K.A. Balloon measurements of X rays in the auroral zone. *Auroral Phenomena*. Ed. M. Walt. Stanford University Press, Stanford, California, 1965, pp. 46–83.

Antonova E.E. Magnetospheric substorms and the sources of inner magnetosphere particle acceleration. *The Inner Magnetosphere: Physics and Modeling*. 2005, pp. 105–111. (*Geophys. Monograph Ser.*, vol. 155). DOI: [10.1029/155GM12](https://doi.org/10.1029/155GM12).

Bakhareva N.F. Nonstationary statistical acceleration of relativistic particles and their role during magnetic storms. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 2003, vol. 43, pp. 737–744. (In Russian).

Baker D.N., Li X., Turner N., Allen J.H., Bargatze L.F., Blake J.B., Sheldon R.B., Spence H.E., Belian R.D., Reeves G.D., Kanekal S.G., Klecker B., Lepping R.P., Ogilvie K., Mewaldt R.A., Onsager T., Singer H.J., Rostoker G. Recurrent geomagnetic storms and relativistic electron enhancements in the outer magnetosphere: ISTP coordinated measurements. *J. Geophys. Res.* 1997, vol. 102, pp. 14,141–14,148. DOI: [10.1029/97JA00565](https://doi.org/10.1029/97JA00565).

Califf S., Li X., Zhao H. The role of the convection electric field in filling the slot region between the inner and outer radiation belts. *J. Geophys. Res.* 2017, vol. 122, pp. 2051–2068. DOI: [10.1002/2016JA023657](https://doi.org/10.1002/2016JA023657).

Claudepierre S.G., Reeves G.D., O'Brien T.P., Fennell J.F., Blake J.B., Clemmons J.H., Looper M.D., Mazur J.E., Roeder J.L., Turner D.L. The hidden dynamics of relativistic

- electrons (0.7–1.5 MeV) in the inner zone and slot region. *J. Geophys. Res.* 2017, vol. 122, pp. 3127–3144. DOI: [10.1002/2016JA023719](https://doi.org/10.1002/2016JA023719).
- Daibog E.I., Kechkemeti K., Lazutin L.L., Logachev Yu.I., Surova G.M. Relativistic electrons in the Earth's tail at the solar activity minimum. *Izvestiya RAN. Seriya Fizicheskaya* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics]. 2015, vol. 79, no. 5, pp. 701–703. DOI: [10.7868/S0367676515050191](https://doi.org/10.7868/S0367676515050191). (In Russian).
- Demekhov A.G., Trakhtengerts V.Yu., Rycroft M.J., Nunn D. Electron acceleration in the magnetosphere by whistler-mode waves of varying frequency. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 2006, vol. 46, no. 6, pp. 711–716. (In Russian).
- Dmitriev A.V., Chao J.-K. Dependence of geosynchronous relativistic electron enhancements on geomagnetic parameters. *J. Geophys. Res.* 2003, vol. 108, pp. 1388. DOI: [10.1029/2002JA009664](https://doi.org/10.1029/2002JA009664).
- Dmitriev A.V., Jayachandran P.T., Tsai L.-C. Elliptical model of cutoff boundaries for the solar energetic particles measured by POES satellites in December 2006. *J. Geophys. Res.* 2010, vol. 115, A12244. DOI: [10.1029/2010JA015380](https://doi.org/10.1029/2010JA015380).
- Dmitriev A.V., Suvorova A.V., Chao J.K., Wang C.B., Rastaetter L., Panasyuk M.I., Lazutin L.L., Kovtyukh A.S., Veselovsky I.S., Myagkova I.N. Anomalous dynamics of the extremely compressed magnetosphere during 21 January 2005 magnetic storm. *J. Geophys. Res.* 2014, vol. 119, iss. 2, pp. 877–896. DOI: [10.1002/2013JA019534](https://doi.org/10.1002/2013JA019534).
- 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.* 1999, vol. 26, iss. 21, pp. 3273–3276. DOI: [10.1029/1999GL003659](https://doi.org/10.1029/1999GL003659).
- 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.* 2017, vol. 122, pp. 324–339. DOI: [10.1002/2016JA023429](https://doi.org/10.1002/2016JA023429).
- Friedel R.H.W., Reeves G.D., Obara T. Relativistic electron dynamics in the inner magnetosphere — a review. *J. Atmos. Solut-Terr. Phys.* 2002, vol. 64, iss. 2, pp. 265–282. DOI: [https://dx.doi.org/10.1016/S1364-6826\(01\)00088-8](https://dx.doi.org/10.1016/S1364-6826(01)00088-8).
- Gabrielse C., Harris C., Angelopoulos V., Artemyev A., Runov A. The role of localized inductive electric fields in electron injections around dipolarizing flux bundles. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2016, vol. 121, pp. 9560–9585. DOI: [10.1002/2016JA023061](https://doi.org/10.1002/2016JA023061).
- Gabrielse C., Angelopoulos V., Harris C., Artemyev A., Kepko L., Runov A. Extensive electron transport and energization via multiple, localized dipolarizing flux bundles. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2017, vol. 122, pp. 5059–5076. DOI: [10.1002/2017JA023981](https://doi.org/10.1002/2017JA023981).
- Horne R.B., Thorne R.M. Potential waves for relativistic electron scattering and stochastic acceleration during magnetic storms. *Geophys. Res. Lett.* 1998, vol. 25, iss. 15, pp. 3011–3014. DOI: [10.1029/98GL01002](https://doi.org/10.1029/98GL01002).
- Horne R.B., Thorne R.M. Relativistic electron acceleration and precipitation during resonant interactions with whistler mode chorus. *Geophys. Res. Lett.* 2003, vol. 30, iss. 10, 1527. DOI: [10.1029/2003GL016973](https://doi.org/10.1029/2003GL016973).
- Horne R.B., Thorne R.M., Glauert S.A., Albert J.M., Meredith N.P., Anderson R.R. Timescale for radiation belt electron acceleration by whistler mode chorus waves. *J. Geophys. Res.* 2005, vol. 110, A03225. DOI: [10.1029/2004JA010811](https://doi.org/10.1029/2004JA010811).
- Hudson M.K., Baker D.N., Goldstein J., Kress B.T., Paral J., Toffoletto F.R., Wiltberger M. Simulated magnetopause losses and Van Allen Probe flux dropouts. *Geophys. Res. Lett.* 2014, vol. 41, pp. 1113–1118. DOI: [10.1002/2014GL059222](https://doi.org/10.1002/2014GL059222).
- Hwang J., Choi E.-J., Park J.-S., Fok M.C., Lee D.Y., Kim K.C., Shin D.K., Usanova M.E., Reeves G.D. Comprehensive analysis of the flux dropout during 7–8 November 2008 storm using multisatellite observations and RBE model. *J. Geophys. Res.* 2015, vol. 120, iss. 6, pp. 4298–4312. DOI: [10.1002/2015JA021085](https://doi.org/10.1002/2015JA021085).
- Ivanova T.A., Pavlov N.N., Rezman S.Ya., Rubinshtein I.A., Sosnovets E.N., Tverskaya L.V. Dynamics of the outer radiation belt of relativistic electrons in the solar activity minimum. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 2000, vol. 40, no. 1, pp. 13–18.
- Jaynes A.N., Li X., Schiller Q.G., Blum L.W., Tu W., Turner D.L., Ni B., Bortnik J., Baker D.N., Kanekal S.G., Blake J.B., Wygant J. Evolution of relativistic outer belt electrons during an extended quiescent period. *J. Geophys. Res.* 2014, vol. 119, iss. 12, pp. 9558–9566. DOI: [10.1002/2014JA020125](https://doi.org/10.1002/2014JA020125).
- Jaynes A.N., Baker D.N., Singer H.J., Rodriguez J.V., Loto'aniu T.M., Ali A.F., Elkington S.R., Li X., Kanekal S.G., Fennell J.F., Li W., Thorne R.M., Kletzing C.A., Spence H.E., Reeves G.D. Source and seed populations for relativistic electrons: their roles in radiation belt changes. *J. Geophys. Res.* 2015, vol. 120, iss. 9, pp. 7240–7254. DOI: [10.1002/2015JA021234](https://doi.org/10.1002/2015JA021234).
- Kabin K., Kalugin G., Donovan E., Spanswick E. Particle energization by a substorm depolarization. *J. Geophys. Res.* 2017, vol. 122, pp. 349–367. DOI: [10.1002/2016JA023459](https://doi.org/10.1002/2016JA023459).
- Kalegaev V.V., Vlasova N.A. The Earth's magnetosphere response to interplanetary medium conditions on January 21–22, 2005 and on December 14–15, 2006. *Adv. Space Res.* 2014, vol. 54, pp. 517–527. DOI: [10.1016/j.asr.2013.11.015](https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.11.015).
- Kalegaev V.V., Vlasova N.A., Peng J. Magnetosphere dynamics during 21–22.01.2005 and 14–15.12.2006 magnetic storms. *Kosmicheskie issledovaniya* [Cosmic Research]. 2015, vol. 53, no. 2, pp. 105–117. DOI: [10.7868/S002342061502003X](https://doi.org/10.7868/S002342061502003X). (In Russian).
- Kataoka R., Miyoshi Y. Why are relativistic electrons persistently quiet at geosynchronous orbit in 2009? *Space Weather*. 2010, vol. 8, S08002. DOI: [10.1029/2010SW000571](https://doi.org/10.1029/2010SW000571).
- Kim H.J., Chan A.A. Fully adiabatic changes in stormtime relativistic electron fluxes. *J. Geophys. Res.* 1997, vol. 102, p. 22,107. DOI: [10.1029/97JA01814](https://doi.org/10.1029/97JA01814).
- Kim K.C., Lee D.-Y., Kim H.-J., Lyons L.R., Lee E.S., Oztürk M.K., Choi C.R. Numerical calculations of relativistic electron drift loss effect. *J. Geophys. Res.* 2008, vol. 113, A09212. DOI: [10.1029/2007JA013011](https://doi.org/10.1029/2007JA013011).
- Kubota Y., Omura Y. Rapid precipitation of radiation belt electrons induced by EMIC rising tone emissions localized in longitude inside and outside the plasmapause. *J. Geophys. Res.* 2017, vol. 122, pp. 293–309. DOI: [10.1002/2016JA023267](https://doi.org/10.1002/2016JA023267).
- Kuznetsov S.N. The behavior of the outer radiation belt of the Earth according to satellites Electron-1 and Electron-2. *Izvestiya RAN. Seriya Fizicheskaya* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics]. 1966, vol. 30, iss. 11, pp. 1829–1837. (In Russian).
- Kuznetsov S.N., Lazutin L.L., Panasyuk M.I., Starostin L.I., Gotseliuk Yu.V., Hasebe N., Sukurai K., Hareyama M. Solar particle dynamics during magnetic storms of July 23–27, 2009. *Adv. Space Res.* 2008, vol. 45, iss. 4, pp. 553–558. DOI: [10.1016/j.asr.2008.09.014](https://doi.org/10.1016/j.asr.2008.09.014).
- Lazutin L.L. On radiation belt dynamics during magnetic storm. *Adv. Space Res.* 2012, vol. 49, no 2, pp. 302–315. DOI: [10.1016/j.asr.2011.09.015](https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.09.015).
- Lazutin L.L. Dawn–dusk asymmetry and adiabatic dynamic of the radiation belt electrons during magnetic storm. *Adv. Space Res.* 2016, vol. 58, iss. 6, pp. 897–902. DOI: [10.1016/j.asr.2016.05.047](https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.05.047).
- Lazutin L.L. Depletion of the outer radiation belt during low activity years. *Adv. Space Res.* 2017, vol. 59, iss. 9, pp. 2248–2254. DOI: [10.1016/j.asr.2017.02.008](https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.02.008).
- Lazutin L.L., Panasyuk M.I., Hasebe N. Accelerations and losses of energetic protons and electrons during August 30–31, 2004 magnetic storm. *Cosmic Res.* 2011, vol. 49, no. 1, pp. 35–41.

Lazutin L.L., Logachev Yu.I., Muravieva E.A., Petrov V.L. Relaxation of electron and proton radiation belts of the Earth after strong magnetic storms. *Kosmicheskie issledovaniya* [Cosmic Research]. 2012, vol. 50, no. 1, pp. 3–14. (In Russian).

Lazutin L.L. Injection of relativistic electrons into the internal magnetosphere during magnetic storms: connection with substorms. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 2013, vol. 53, no. 6, pp. 716–732. DOI: [10.7868/S0016794013050118](https://doi.org/10.7868/S0016794013050118). (In Russian).

Lee D.-Y., Shin D.-K., Kim J.-H., Cho J.-H., Kim K.-C., Hwang, J.A., Turner D.L., Kim T.K., Park M.-Y. Long-term loss and reformation of the outer radiation belt. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2013, vol. 118, pp. 3297–3313. DOI: [10.1002/jgra.50357](https://doi.org/10.1002/jgra.50357).

Li X., Roth I., Temerin M., Wygant J.R., Hudson M.K., Blake J.B. Simulations of the prompt energization and transport of radiation belt particles during the March 24, 1991 SSC. *Geophys. Res. Lett.* 1993, vol. 20, p. 2423.

Li X., Baker D.N., Temerin M., Cayton T.E., Reeves G.D., Christensen R.A., Blake J.B., Looper M.D., Nakamura R., Kanekal S.G. Multisatellite observations of the outer zone electron variation during the November 3–4, 1993, magnetic storm. *J. Geophys. Res.* 1997, vol. 102, iss. A7, pp. 14,123–14,140. DOI: [10.1029/97JA01101](https://doi.org/10.1029/97JA01101).

Li X., Temerin M., Baker D.N., Reeves G.D., Larson D. Quantitative prediction of radiation belt electrons at geostationary orbit based on solar wind measurements. *Geophys. Res. Lett.* 2001, vol. 28, iss. 9, pp. 1887–1890. DOI: [10.1029/2000GL012681](https://doi.org/10.1029/2000GL012681).

Li X., Temerin M., Baker D.N., Reeves G.D. Behavior of MeV electrons at geosynchronous orbit during last two solar cycles. *J. Geophys. Res.* 2011, vol. 116, A11207. DOI: [10.1029/2011JA016934](https://doi.org/10.1029/2011JA016934).

Logachev Yu.I., Lazutin L.L. On the belt of energetic electrons at  $L=2.75$  in the Earth's magnetosphere. *Cosmic Res.* 2012, vol. 50, no. 2, p. 116.

Matsumura C., Miyoshi Y., Seki K., Saito S., Angelopoulos V., Koller J. Outer radiation belt boundary location relative to the magnetopause: Implications for magnetopause shadowing. *J. Geophys. Res.* 2011, vol. 116, A06212. DOI: [10.1029/2011JA016575](https://doi.org/10.1029/2011JA016575).

McIlwain C.E. Ring current effects on trapped particles. *J. Geophys. Res.* 1966, vol. 71, p. 3623.

Meredith N.P., Horne R.B., Glauert S.A., Anderson R.R. Slot region electron loss timescales due to plasmaspheric hiss and lightning generated whistlers. *J. Geophys. Res.* 2007, vol. 112, A08214. DOI: [10.1029/2007JA012413](https://doi.org/10.1029/2007JA012413).

Millan R.M., Baker D.N. Acceleration of particles to high energies in Earth's radiation belts. *Space Sci. Rev.* 2012, vol. 173, iss. 1–4, pp. 103–131. DOI: [10.1007/s11214-012-9941-x](https://doi.org/10.1007/s11214-012-9941-x).

Millan R.M., Thorne R.M. Review of radiation belt relativistic electron losses. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2007, vol. 69, pp. 362–377. DOI: [10.1016/j.jastp.2006.06.019](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2006.06.019).

Ni B., Xing Cao, Zhengyang Zou. Resonant scattering of outer zone relativistic electrons by multiband EMIC waves and resultant electron loss time scales. *J. Geophys. Res.* 2015, vol. 120, iss. 9, pp. 7357–7373. DOI: [10.1002/2015JA021466](https://doi.org/10.1002/2015JA021466).

Nishida A. Outward diffusion of energetic particles from the Jovian radiation belt. *J. Geophys. Res.* 1976, vol. 81, p. 1771.

Parks G.K., Winkler J.R. Acceleration of energetic electrons observed at the synchronous altitude during magnetospheric substorms. *J. Geophys. Res.* 1968, vol. 73, p. 5786.

Pavlov N.N., Tverskaya L.V., Tverskoy B.A., Chuchkov E.A. Radiation belt particle flux changes during strong magnetic storm of March 24, 1991. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 1993, vol. 33, no. 6, pp. 41–45. (In Russian).

Reeves G.D., Baker D.N., Belian R.D., Blake J.B., Cayton T.E., Fennell J.F., Friedel R.H.W., Meier M.M., Selesnick R.S., Spence H.E. The global response of relativistic

radiation belt electrons to the January 1997 magnetic cloud. *Geophys. Res. Lett.* 1998, vol. 17, iss. 25, p. 3265. DOI: [10.1029/98GL02509](https://doi.org/10.1029/98GL02509).

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.* 2003, vol. 30, iss. 10, p. 1529. DOI: [10.1029/2002GL016513](https://doi.org/10.1029/2002GL016513).

Potapov A.S. Outer radiation belt relativistic electrons and prediction methods (review). *Solnechno-zemnaya fizika* [Solar-Terr. Phys.]. 2017, vol. 3, iss. 1. pp. 46–58. DOI: [10.12737/22210](https://doi.org/10.12737/22210). (In Russian).

Saito S., Miyoshi Y., Seki K. A split in the outer radiation belt by magnetopause shadowing: test particle simulations. *J. Geophys. Res.* 2010, vol. 115, A08210. DOI: [10.1029/2009JA014738](https://doi.org/10.1029/2009JA014738).

Shprits Y.Y., Thorne R.M., Friedel R., Reeves G.D., Fennell J., Baker D.N., Kanekal S.G. Outward radial diffusion driven by losses at magnetopause. *J. Geophys. Res.* 2006, vol. 111, A11214. DOI: [10.1029/2006JA011657](https://doi.org/10.1029/2006JA011657).

Shprits Y.Y., Elkington S., Meredith N.P., Subbotin D.A. Review of modeling of losses and sources of relativistic electrons in the outer radiation belt I: radial transport. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2008a, vol. 70, pp. 1679–1693. DOI: [10.1016/j.jastp.2008.06.008](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2008.06.008).

Shprits Y.Y., Subbotin D.A., Meredith N.P., Elkington S. Review of modeling of losses and sources of relativistic electrons in the outer radiation belt II: local acceleration and losses. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2008b, vol. 70, pp. 1694–1713. DOI: [10.1016/j.jastp.2008.06.014](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2008.06.014).

Simms L.E., Engebretson M.J., Pilipenko V., Reeves G.D., Clilverd M. Empirical predictive models of daily relativistic electron flux at geostationary orbit: multiple regression analysis. *J. Geophys. Res.* 2016, vol. 121, pp. 3181–3197. DOI: [10.1002/2016JA022414](https://doi.org/10.1002/2016JA022414).

Slivka M., Kudela K., Kuznetsov S.N. Some aspects of relativistic electron fluxes dynamics in the outer radiation belt during magnetic storms. *Acta Physica Slovaca.* 2006. vol. 56, no. 2, pp. 103–107.

Summers D., Thorne R.M. Relativistic electron pitch-angle scattering by electromagnetic ion cyclotron waves during geomagnetic storms. *J. Geophys. Res.* 2003. vol. 108, iss. A4, p. 1143. DOI: [10.1029/2002JA009489](https://doi.org/10.1029/2002JA009489).

Summers D., Ma C., Mukai T. Competition between acceleration and loss mechanisms of relativistic electrons during geomagnetic storms. *J. Geophys. Res.* 2004, vol. 109, A04221. DOI: [10.1029/2004JA010437](https://doi.org/10.1029/2004JA010437).

Summers D., Thorne R.M., Xiao F. Relativistic theory of waveparticle resonant diffusion with application to electron acceleration in the magnetosphere. *J. Geophys. Res.* 1998, vol. 103, iss. A9, pp. 20487–20500. DOI: [10.1029/98JA01740](https://doi.org/10.1029/98JA01740).

Tang C.L., Zhang J.-C., Reeves G.D., Su Z.P., Baker D.N., Spence H.E., Funsten H.O., Blake J.B., Wygant J.R. Prompt enhancement of the Earth's outer radiation belt due to substorm electron injections. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2016, vol. 121, pp. 11,826–11,838. DOI: [10.1002/2016JA023550](https://doi.org/10.1002/2016JA023550).

Turner D.L., Shprits Y., Hartinger M., Angelopoulos V. Explaining sudden losses of outer radiation belt electrons during geomagnetic storms. *Nat. Phys.* 2012, vol. 8, pp. 208–212. DOI: [10.1038/nphys2185](https://doi.org/10.1038/nphys2185).

Turner D.L., O'Brien T.P., Fennell J.F. S. Claudepierre G., Blake J.B., Jaynes A.N., Baker D.N., Kanekal S., Gkioulidou M., Henderson M.G., Reeves G.D. Investigating the source of near-relativistic and relativistic electrons in Earth's inner radiation belt. *J. Geophys. Res.* 2017, vol. 122, pp. 695–710. DOI: [10.1002/2016JA023600](https://doi.org/10.1002/2016JA023600).

Tverskaya L.V., Ivanova T.A., Pavlov N.N., Reizman S.Ya., Rubinstein I.A., Sosnovets E.N., Veden'kin N.N. Storm-time formation of a relativistic electron belt and some relevant phenomena in other magnetospheric plasma domains. *Adv. Space Res.* 2005, vol. 36, pp. 2392–2400. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2003.09.071>.

Tverskoi B.A. *Osnovy teoreticheskoi kosmofiziki* [Foundations of Theoretical Space Physics]. Moscow, URSS Publ., 2004. (In Rui B.A. Dynamics of the Earth's radiation belts. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 1964, vol. 4, pp. 436–448. (In Russian).

Tverskoi B.A. Transfer and acceleration of charged particles in the magnetosphere of the Earth. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 1965, vol. 5, pp. 793–809. (In Russian).

Ukhorskiy A.Y., Anderson B.J., Takahashi K., Tsyganenko N.A. The impact of ULF oscillations in solar wind dynamic pressure on the outer radiation belt electrons. *Geophys. Res. Lett.* 2006, vol. 33, iss. 6, L06111. DOI: 10.1029/2005GL024380.

Ukhorskiy A.Y., Sitnov M.I., Millan R.M., Kress B.T., Fennell J.F., Claudepierre S.G., Barnes R.J. Global storm time depletion of the outer electron belt. *J. Geophys. Res.* 2015, vol. 120, iss. 4, pp. 2543–2556. DOI: 10.1002/2014JA020645.

Vampola A.L., Korth A. Electron drift echoes in the inner magnetosphere. *J. Geophys. Res.* 1992, vol. 19, iss. 6, pp. 625–628. DOI: 10.1029/92GL00121.

Vernov S.N., Gorchakov E.V., Kuznetsov S.N., Logachev Yu.I., Sosnovets E.N., Stolpovs V.G. Particle fluxes in the outer geomagnetic field. *Rev. Geophys.* 1969, vol. 7, no. 12, pp. 257–280.

Vernov S.N., Chudakov A.E., Vakulov P.V., Gorchakov Ye.V., Kuznetsov S.N., Logachev Yu.I., Nikolaev A.G., Rubinshtein I.A., Sosnovets E.N., Stolpovsky V.G., El'tekov V.A. Results of the investigation of radiation belt particle position and energy based on satellite Electron-1 and Electron-2 measurements. *Space Investigations*. Moscow, Nauka Publ., 1965, pp. 394–405. (In Russian).

Xiao F., Chang Yang, Zhaoguo He, Zhenpeng Su, Qinghua Zhou, Yihua He, Kletzing C.A., Kurth W.S., Hospodarsky G.B., Spence H.E., Reeves G.D., Funsten H.O., Blake J.B., Baker D.N., Wygant J.R. Chorus acceleration of radiation belt relativistic electrons during March 2013 geomagnetic storm. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2014, vol. 119, pp. 3325–3332. DOI: 10.1002/2014JA019822.

Yang X.C., Zhu G.W., Zhang X.X., Sun Y.Q., Liang J.B., Wei X.H. An unusual long-lived relativistic electron enhancement event excited by sequential CMEs. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2014, vol. 119, p. 119. DOI: 10.1002/2014JA019797.

Ying Xiong, Lun Xie, Zuyin Pu, Suiyan Fu, Lunjin Chen, Binbin Ni, Wen Li, Jinxing Li, Ruilong Guo, Parks G.K. Responses of relativistic electron fluxes in the outer radiation belt to geomagnetic storms. *J. Geophys. Res.* 2015, vol. 120, iss. 11, pp. 9513–9523. DOI: 10.1002/2015JA021440.

Yu J., Li L.Y., Cao J.B., Yuan Z.G., Reeves G.D., Baker D.N., Blake J.B., Spence H. Multiple loss processes of relativistic electrons outside the heart of outer radiation belt during a storm sudden commencement. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2015, vol. 120, pp. 10,275–10,288. DOI: 10.1002/2015JA021460.

Zakharov A.V., Kuznetsov S.N. Electron precipitation and VLF emission. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 1978, vol. 18, no. 2, pp. 352–353.

Zhenpeng Su, Hui Zhu, Fuliang Xiao, Huinan Zheng, Yuming Wang, Q.-G. Zong, Zhaoguo He, Chao Shen, Min Zhang, Shui Wang, Kletzing C.A., Kurth W.S., Hospodarsky G.B., Spence H.E., Reeves G.D., Funsten H.O., Blake J.B., Baker D.N. Quantifying the relative contributions of substorm injections and chorus waves to the rapid outward extension of electron radiation belt. *J. Geophys. Res.* 2014, vol. 119, iss. 12, pp. 10,023–10,040. DOI: 10.1002/2014JA020709.

#### Как цитировать эту статью

Лазутин Л.Л., Дмитриев А.В., Суворова А.В. Динамика электронного радиационного пояса во время магнитных возмущений и в спокойное время. *Солнечно-земная физика*. 2018. Т. 4, № 1. С. 59–71. DOI: 10.12737/szf-41201805.