

УДК 550.385

## ДИНАМИКА ПОТОКОВ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ ВНЕШНЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ВО ВРЕМЯ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ РАЗНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

© 2021 г. Н. А. Власова<sup>1</sup>, \*, В. В. Калегаев<sup>1</sup>, И. С. Назарков<sup>1</sup><sup>1</sup>Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (НИИЯФ МГУ), г. Москва, Россия

\*e-mail: nav19iv@gmail.com

Поступила в редакцию 11.08.2020 г.

После доработки 15.09.2020 г.

Принята к публикации 28.01.2021 г.

Представлены результаты исследования зависимости динамики потоков релятивистских электронов внешнего радиационного пояса Земли от интенсивности геомагнитной бури. Рассмотрены 22 геомагнитные бури с  $|Dst|_{\max}$  от  $\sim 50$  нТл до  $\sim 200$  нТл. Исследования основаны на экспериментальных данных по потокам электронов с энергией  $\sim 2$  МэВ, полученных с космического аппарата Van Allen Probe в сердцевине радиационных поясов и ИСЗ GOES на геостационарной орбите. Показано, что доминирующее влияние на динамику релятивистских электронов в сердцевине внешнего радиационного пояса Земли во время сильных магнитных бурь с  $|Dst|_{\max} \sim \geq 120$  нТл оказывают глобальные изменения магнитосферного магнитного поля, приводящие к адиабатическим вариациям потоков релятивистских электронов.

DOI: 10.31857/S0016794021030184

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Магнитосфера Земли — самосогласованная система, сформированная магнитным полем Земли под воздействием солнечного ветра. Вариации параметров межпланетной среды приводят к изменению магнитосферного магнитного поля и проявляются в динамике популяций заряженных частиц разных энергий. Одной из таких популяций, а также важным фактором космической погоды, является внешний электронный радиационный пояс, впервые зарегистрированный в эксперименте на ИСЗ Спутник-2, проведенном коллективом сотрудников НИИЯФ МГУ под руководством С.Н. Вернова [Vernov et al., 1960].

Наиболее значительные изменения внешнего электронного радиационного пояса Земли наблюдаются во время геомагнитных бурь, поэтому естественно предположить, что вариации магнитосферного магнитного поля должны быть одним из главных факторов, управляющих динамикой потоков электронов внешнего радиационного пояса (РП). Вариации внешнего электронного РП могут происходить при сохранении адиабатических инвариантов при условии относительно медленных изменений геомагнитного поля по сравнению с характерными временами движения электронов. Именно такая ситуация может наблюдаться во время геомагнитной бури. При этом

могут регистрироваться изменения потоков электронов, не связанные с реальными потерями частиц.

На главной фазе геомагнитной бури обычно наблюдается падение интенсивности потока релятивистских электронов внешнего РП. В работе [McIlwain, 1966] был впервые предложен механизм, приводящий к падению потока электронов РП на главной фазе геомагнитной бури и связанный с адиабатическим расширением дрейфовых оболочек внутренней магнитосферы, — так называемый  $Dst$ -эффект. В работе [Lazutin et al., 2018] сделан вывод, что на главной фазе геомагнитной бури основной причиной падения потоков релятивистских электронов внешнего радиационного пояса является адиабатическое охлаждение, связанное с депрессией магнитного поля во внутренней магнитосфере.

Наряду с адиабатическим механизмом вариаций потоков захваченных электронов в радиационных поясах, несомненно, присутствуют и процессы, приводящие к реальным потерям. Основными механизмами потерь частиц на главной фазе геомагнитной бури считаются выпячивания частиц при взаимодействии с волнами вследствие питч-угловой диффузии и потери электронов при смещении магнитопаузы [Тверской, 1968, 2004]. В результате резонансного взаимодействия с низ-

кочастотными волнами либо с плазмосферными шипениями происходит изменение питч-углового распределения захваченных частиц, приводящее к их высыпанию в атмосферу из конуса потерь [Shprits et al., 2008; Xiao et al., 2014]. Увеличение давления солнечного ветра может привести к компрессии магнитосферы, при этом внешняя часть популяции захваченных электронов может оказаться на разомкнутых  $L$ -оболочках. Результатом такого процесса становится выход энергичных электронов за пределы магнитосферы [Turner et al., 2012].

В результате адиабатических и неадиабатических процессов на фазе восстановления геомагнитной бури поток релятивистских электронов внешнего радиационного пояса может возрасти, уменьшиться или остаться неизменным по сравнению с добуравым уровнем [Friedel et al., 2002; Reeves et al., 2003; Anderson et al., 2015; Moya et al., 2017]. Один из основных процессов при формировании РП — это движение частиц внутрь РП в процессе диполизации [Тверской, 1968, 2004]. На фазе восстановления геомагнитной бури происходит втягивание силовых линий геомагнитного поля из хвоста магнитосферы в область захваченной радиации — обратный  $Dst$ -эффект. Теория магнитной диффузии вследствие возникновения индукционных полей при внезапных импульсах геомагнитного поля обосновывает существование диффузионных волн потоков релятивистских электронов [Тверской, 1968, 2004]. Механизм “ударной” инжекции частиц под действием внезапного биполярного импульса геомагнитного поля объясняет очень быстрое (в течение нескольких минут) появления или усиление радиационного пояса [Павлов и др., 1993].

Важным фактором, влияющим на динамику радиационных поясов, является сильный импульс давления солнечного ветра, в результате воздействия которого может возникать кольцевой ток, после чего происходит смещение внутренней границы и максимума потоков электронов внешнего электронного пояса вглубь магнитосферы Земли [Калегаев и др., 2015; Власова и др., 2020]. “Буревая” инжекция — процесс, состоящий из двух этапов и ускоряющий популяцию частиц плазменного слоя под воздействием сначала суббуревой активности (до первых сотен кэВ), а затем за счет взаимодействия с волнами до субрелятивистских и релятивистских энергий (например, обзор [Baker et al., 2018] и ссылки в нем). В качестве главных механизмов ускорения электронов до релятивистских энергий рассматриваются резонансное взаимодействие между электронами и ОНЧ-волнами (например, [Horne et al., 2005]) и быстрая, меняющаяся во времени, радиальная диффузия электронов под воздействием УНЧ-волн (например, [Ukhorskiy et al., 2006]).

В работе [Reeves et al., 2013] в качестве механизмов пополнения внешнего электронного радиационного пояса предполагается два класса процессов: перенос и ускорение от источника частиц, расположенного вне радиационных поясов (радиальное ускорение) и ускорение низко-энергичных электронов до релятивистских энергий непосредственно в сердцевине радиационных поясов (локальное ускорение). В работе [Zhao et al., 2017] приведены результаты корреляционного анализа функции плотности в фазовом пространстве электронов и различных параметров солнечного ветра и ММП и геомагнитных индексов, которые свидетельствуют о том, что для увеличения функции плотности в фазовом пространстве электронов наиболее важно суббуревое ускорение электронов. В работе [Antonova et al., 2018] кроме “суббуревое” ускорения подчеркнута роль адиабатического ускорения.

Не до конца решенная проблема — влияние факторов межпланетной среды на динамику внешнего электронного пояса. Среди наиболее часто упоминаемых параметров можно назвать скорость солнечного ветра [Paulikas and Blake, 1979], южную ориентацию межпланетного магнитного поля [Blake et al., 1997] и низкую плотность солнечного ветра [Lyatsky and Khazanov, 2008]. В работе [Newell et al., 2007] рассматривается геоэффективность различных функций связи, в частности, комбинация северной компоненты ММП ( $B_z$ ) и скорости солнечного ветра ( $V_{sw}$ ), как одного из наиболее важных геоэффективных параметров. Периодические осцилляции геомагнитного поля ультранизкой частоты при увеличении скорости и плотности солнечного ветра и длительной южной ориентации ММП оказывают влияние на динамику радиационных поясов [Georgiou et al., 2018]. В работе [Власова и др., 2020] делается предположение, что этот механизм способствует движению электронов вглубь радиационных поясов в течение продолжительного периода устойчивой ориентации электрического поля “утро—вечер” в ночной магнитосфере и является необходимым условием для роста интенсивности потоков внешнего электронного радиационного пояса Земли на фазе восстановления геомагнитных бурь.

Воздействие факторов межпланетной среды на динамику внешнего радиационного пояса реализуется через вариации магнитосферного магнитного поля, наиболее значительные в ходе магнитных бурь. В свою очередь, вариации магнитного поля приводят к разнообразным физическим явлениям в магнитосфере, изменяющим состояние внешнего радиационного пояса.

Цель настоящей работы — исследование динамики потоков релятивистских электронов внешнего радиационного пояса во время бурь разной

Таблица 1. Список геомагнитных бурь

№	Дата	Интенсивность бури: $ Dst _{\max}$ , нТл	№	Дата	Интенсивность бури: $ Dst _{\max}$ , нТл
1	2012 10 01	122	12	2015 06 23	204
2	2013 03 17	132	13	2015 10 07	124
3	2013 06 01	124	14	2015 12 14	47
4	2013 06 29	102	15	2015 12 20	155
5	2013 07 06	87	16	2016 01 01	110
6	2013 10 02	72	17	2016 01 20	93
7	2013 12 08	66	18	2016 03 06	98
8	2014 02 23	54	19	2017 05 28	125
9	2014 02 27	97	20	2017 09 08	124
10	2014 08 27	79	21	2018 08 26	174
11	2015 03 17	222	22	2019 08 05	53

интенсивности на основе экспериментальных данных, полученных в сердцевине радиационных поясов на КА Van Allen Probes и в области геостационарной орбиты на ИСЗ GOES.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Исследование основано на экспериментальных данных по потокам релятивистских электронов внешнего радиационного пояса Земли с энергией 2.1 МэВ, полученных с космического аппарата (КА) Van Allen Probes-A (VAP), первое название миссии – Radiation Belt Storm Probes (RBSP), (<http://vanallenprobes.jhuapl.edu>). КА VAP – 2 идентичных спутника (*a* и *b*), которые функционировали на высокоэллиптической орбите с 2012 г. по 2019 г.: наклонение  $-10^\circ$ ; период обращения – 9 ч; апогей  $\sim 6 R_E$ ; перигей  $\sim 600-700$  км. Ось вращения КА VAP была стабилизирована и направлена на Солнце. Одна из основных целей миссии Radiation Belt Storm Probes – исследование сердцевины радиационных поясов Земли [Mauk et al., 2013]. В представленной работе использованы усредненные по углам данные прибора REPT (Relativistic Electron Proton Telescope), входящего в аппаратуру ECT (Energetic Particle, Composition, and Thermal Plasma Suite) [Spence et al., 2013].

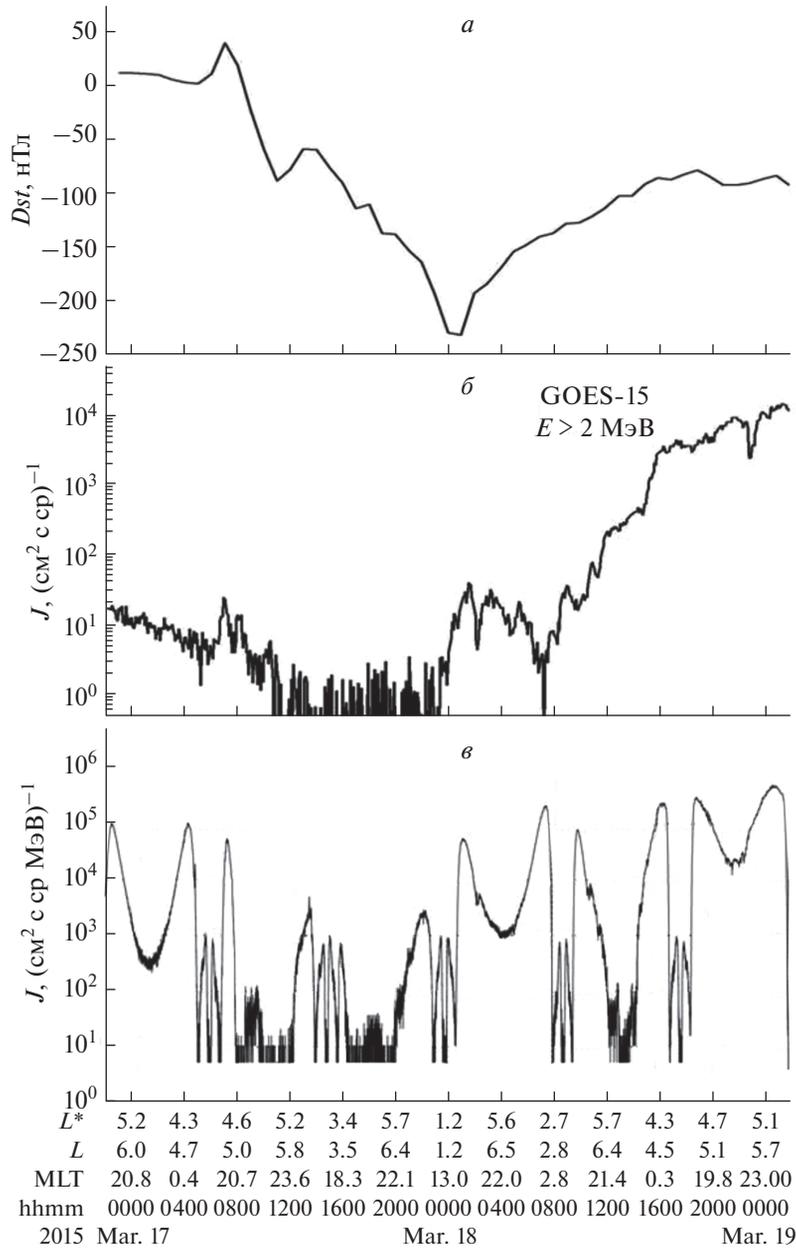
В работе также использованы экспериментальные данные по потокам релятивистских электронов внешнего радиационного пояса Земли с энергией  $>2$  МэВ с ИСЗ GOES с прибора SEM (Space Environment Monitor) (<http://www.ngdc.noaa.gov/stp/satellite/goes>). ИСЗ GOES-15 находится на геостационарной орбите (ГСО). Геомагнитная активность магнитосферы Земли характеризовалась геомагнитным индексом –  $Dst$ -вариацией (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html>). Экспериментальные результаты получены на основе анализа динамики потоков реля-

тивистских электронов внешнего радиационного пояса Земли во время 22 геомагнитных бурь в период функционирования КА VAP (2012–2019 гг.) (табл. 1).

## 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Классическая картина динамики потоков релятивистских электронов внешнего радиационного пояса Земли во время геомагнитной бури – это падение потока электронов на главной фазе бури на фоне глобального уменьшения магнитного поля во внутренней магнитосфере и последующее полное или частичное восстановление или увеличение потока электронов на фазе восстановления (например, рис. 1). Несомненно связь вариаций потоков с изменениями магнитосферного магнитного поля, однако прогнозирование величины минимального и восстановленного потоков электронов во время и после геомагнитной бури пока не представляется возможным.

Исследование параметров внешнего радиационного пояса на разных фазах магнитных бурь разной интенсивности позволяет получить статистические закономерности, отражающие зависимость динамики внешнего радиационного пояса от вариаций магнитного поля. Нами были рассмотрены 22 бури в максимально возможном диапазоне величин  $Dst$ -вариации (от  $\sim -50$  нТл до  $\sim -200$  нТл), произошедшие в 2012–2019 гг. (табл. 1). “Выбраковки” бурь не производилось, то есть все полученные данные были использованы для дальнейшего анализа. По данным КА VAP и ИСЗ GOES были определены параметры, характеризующие интенсивность потоков электронов в максимуме радиационного пояса до момента ( $SC$ ) внезапного начала бури ( $J_0$ ), в максимуме бури (минимальный поток  $J_{\min}$ ) и после бури ( $J_{\max}$ ). По

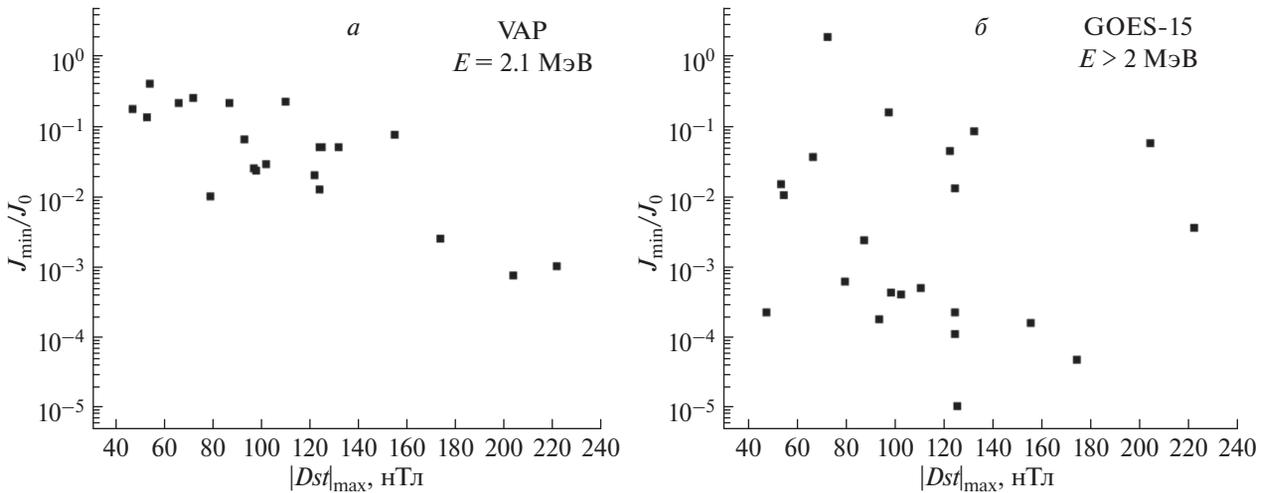


**Рис. 1.** Временные профили 17–18.III.2015: (а) –  $Dst$ -вариации; (б) – потока электронов с  $E > 2$  МэВ по данным ИСЗ GOES; (в) – потока электронов с  $E = 2.1$  МэВ по данным КА VAP.

данным КА VAP было определено положение максимума радиационного пояса по параметру  $L$  после бури ( $L_{max}$ ) и построено распределение  $L_{max}$  в зависимости от максимального за время бури значения модуля  $Dst$ -вариации –  $|Dst|_{max}$ . Для анализа данных были использованы функциональные возможности, предоставляемые на сайте Центра данных оперативного космического мониторинга НИИЯФ МГУ в разделе “Космическая погода” (<http://swx.sinp.msu.ru/>) [Kalegaev et al., 2019].

При определении величин параметров, характеризующих динамику потока электронов, невозможно было добиться полного подобия во всех событиях, вследствие различий временных профилей бурь, а также геомагнитных ситуаций во время предысторий и на фазах восстановления. Это повлияло на большой разброс значений параметров в полученных распределениях в зависимости от  $|Dst|_{max}$ .

Импульс давления солнечного ветра, вариации межпланетного магнитного поля существен-



**Рис. 2.** Зависимость от максимального за время бури значения модуля  $Dst$ -вариации величины отношения: (а) — минимального потока электронов к потоку до бури в максимуме РП по данным КА VAP; (б) — минимального потока электронов к потоку до бури в дневном секторе ГСО по данным ИСЗ GOES.

ным образом влияют как на величину потока электронов в максимуме РП, так и на положение максимума по  $L$ -параметру (например, [Власова и др., 2020]). В то же время, спутники регистрируют потоки электронов в максимуме пояса с задержкой, определяемой параметрами орбиты, что затрудняет оценку отклика радиационного пояса на вариации межпланетной среды и магнитосферного поля. На ГСО рассматривались величины потока в максимуме суточного хода, то есть в дневном секторе магнитосферы. Минимальный поток частиц наблюдается близко к максимуму бури (рис. 1). КА VAP может в это время находиться в другой точке орбиты, так как максимум РП КА VAP проходит примерно через каждые 4 ч. Это вносит некоторую неточность в определение минимального потока в сердцевине РП. По полученным значениям выбранных параметров построены графики зависимости величины отношения  $J_{\min}$  к  $J_0$  от  $|Dst|_{\max}$  для сердцевины РП по данным КА VAP и для ГСО по данным ИСЗ GOES, рис. 2а и 2б соответственно.

Можно видеть, что для ГСО закономерности в распределении экспериментальных точек не наблюдается (рис. 2б). В то же время, для сердцевины РП по данным КА VAP наблюдается явная тенденция к уменьшению отношения  $J_{\min}/J_0$  с увеличением  $|Dst|_{\max}$ , несмотря на разброс точек за счет возможного неоднозначного определения параметров  $J_{\min}$  и  $J_0$  (рис. 2а). Результат кажется очевидным, но именно он является свидетельством того, что вариации магнитосферного магнитного поля во время бури являются одним из основных факторов, определяющих динамику потоков электронов внешнего радиационного пояса. Можно предположить, что большой раз-

брос экспериментальных точек по данным с ГСО (рис. 2б) связан с действием других факторов, влияющих на изменение потока электронов на главной фазе бури. Экспериментальные точки на рис. 2б преимущественно лежат ниже соответствующих точек на рис. 2а, что может быть следствием потерь электронов именно в области ГСО, на внешних  $L$ -оболочках. Один из таких процессов — уход за магнитопаузу на начальной фазе бури. Случаи превышения величины  $J_{\min}/J_0$  на ГСО по сравнению с сердцевиной РП могут быть объяснены пополнением потока на ГСО как за счет частиц, которые переносятся из РП наружу вследствие  $Dst$ -эффекта, так и за счет частиц,двигающихся внутрь РП вследствие дрейфа в скрещенных геомагнитном и электрическом ( $-B_z V_{sw}$ ) полях. Для главной фазы геомагнитной бури характерны большие величины южной компоненты ( $B_z$ ) межпланетного магнитного поля и высокие скорости ( $V_{sw}$ ) солнечного ветра, что благоприятствует развитию разнообразных процессов в ночной и в дневной области магнитосферы, приводящих, как к увеличению потоков на ГСО, так и к их падению.

При определении величины потока электронов на фазе восстановления бури присутствует некоторая неоднозначность, связанная с различной длительностью фаз восстановления, а также с влиянием часто наблюдаемой на фазе восстановления дополнительной геомагнитной активности. Построены графики зависимости величины отношения  $J_{\max}$  к  $J_{\min}$  от  $|Dst|_{\max}$  по данным КА VAP и по данным ИСЗ GOES — рис. 3а и 3б, соответственно. Можно видеть, что, несмотря на разброс точек за счет возможного неоднозначного определения параметров  $J_{\max}$  и  $J_{\min}$ , для сердцеви-

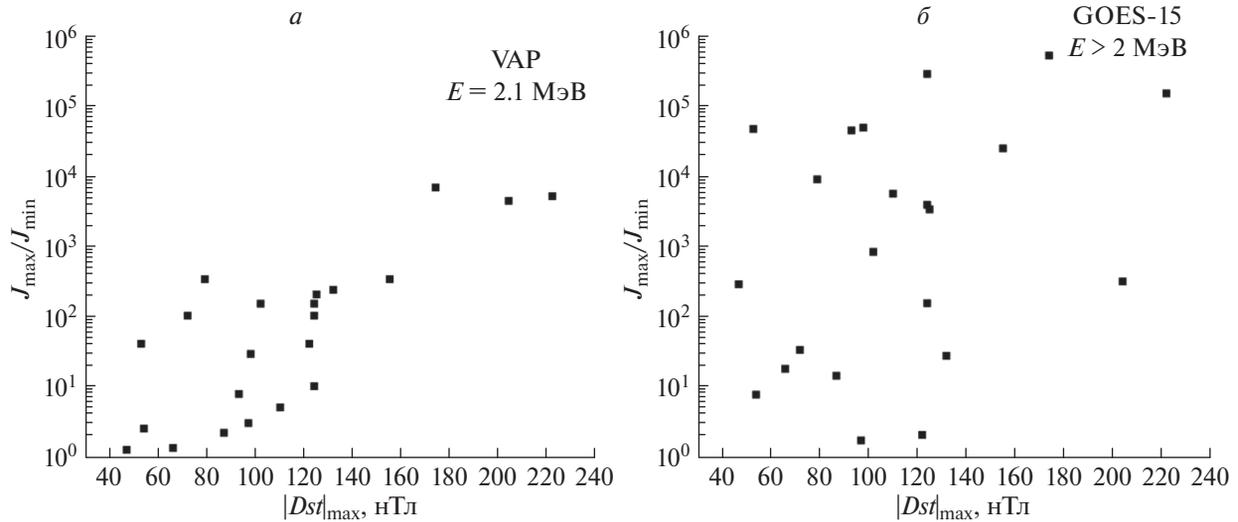


Рис. 3. Зависимость от максимального за время бури значения модуля  $Dst$ -вариации величины отношения: (а) — потока электронов на фазе восстановления бури к минимальному потоку в максимуме РП по данным КА VAP; (б) — потока электронов на фазе восстановления бури к минимальному потоку в дневном секторе ГСО по данным ИСЗ GOES.

ны РП существует явная зависимость от  $|Dst|_{\max}$  (рис. 3а), в то время как на ГСО зависимость от интенсивности бури практически не наблюдается (рис. 3б), так же как и на рис. 2б.

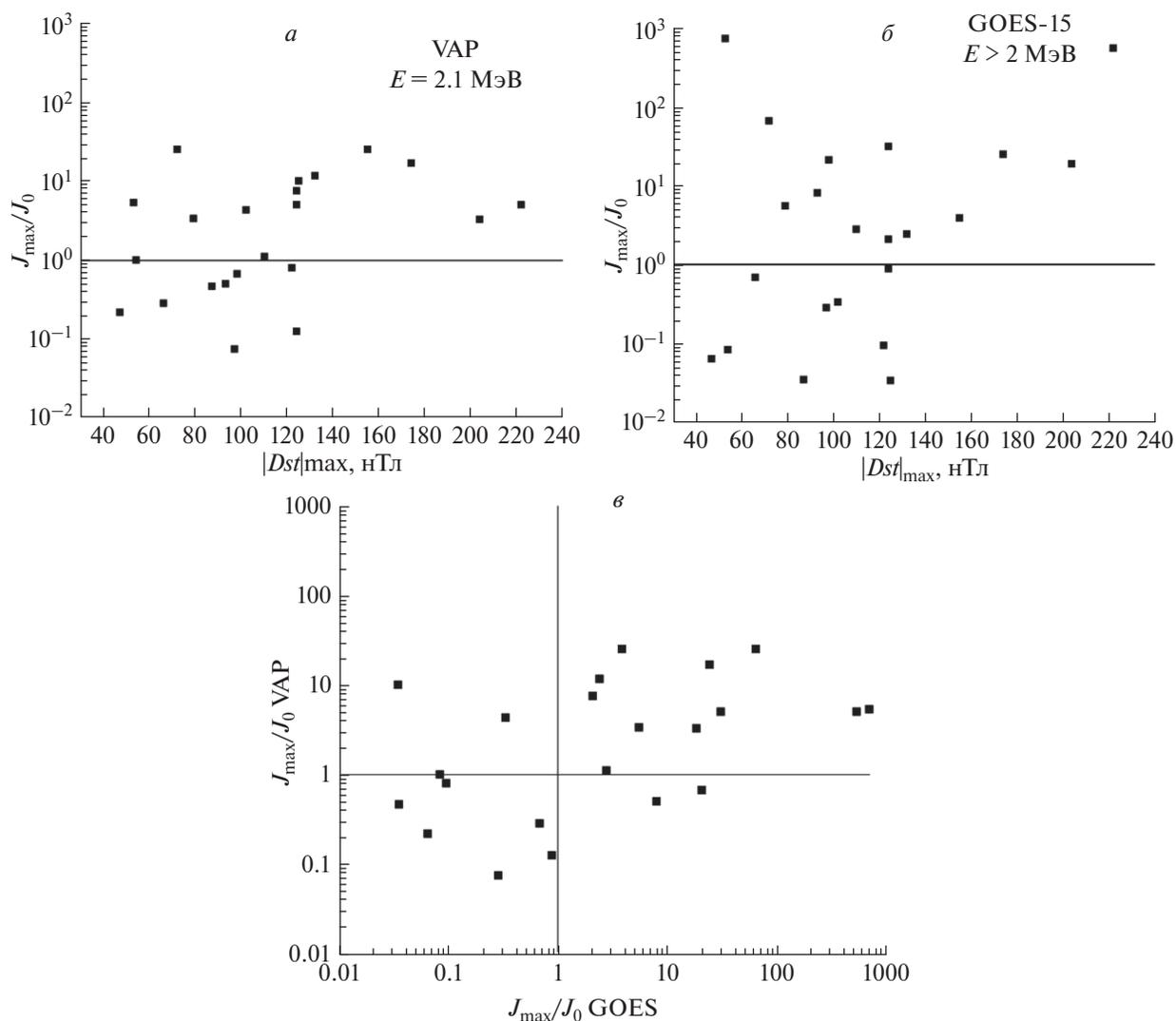
Для исследуемых 22 бурь результаты расчета отношения  $J_{\max}$  к  $J_0$  (рис. 4а и 4б) свидетельствуют о превышении потока на фазе восстановления бури над добуревым уровнем как в сердцевине РП, так и на ГСО примерно в одинаковом количестве событий и составляют  $\sim 59\%$ . В результате статистического исследования 276 умеренных и средних бурь ( $|Dst|_{\max} > 50$  нТл) по данным геостационарного спутника в работе [Reeves et al., 2003] получено, что на фазе восстановления в  $\sim 53\%$  бурь поток электронов увеличивается, в 19% — уменьшается и в 28% — остается без изменения. В работе [Moуа et al., 2017] представлены аналогичные статистические результаты по 78 бурям на основе данных КА VAP, а именно: 45%, 32% и 23%, соответственно. Проведенное в нашей работе исследование по 22 бурям основано на комплексном анализе измерений на ГСО и в сердцевине внешнего РП. Несмотря на меньшую статистическую значимость, полученные результаты исследования согласуются с данными работ [Reeves et al., 2003; Moуа et al., 2017], что придает нашим результатам дополнительную достоверность.

В нашем исследовании по 22 бурям получено (рис. 4а и 4б), что в результате бурь с  $|Dst|_{\max} \sim \leq 120$  нТл и на ГСО, и в сердцевине внешнего радиационного пояса примерно равновероятно уменьшение и возрастание потока частиц, тогда как после сильных бурь с  $|Dst|_{\max} \sim > 120$  нТл поток на фазе восстановления превышает добуревой

уровень. В работе [Anderson et al., 2015] приведены результаты статистического анализа соотношений потоков до и после бурь по данным ИСЗ GOES для 342 слабых бурь ( $|Dst|_{\max} < 50$  нТл). Показано, что результат для слабых бурь аналогичен результату для умеренных и сильных бурь, но только число событий с уменьшением потоков электронов для слабых бурь больше на 10% за счет событий с возрастанием потоков.

Можно видеть, что на ГСО диапазон величин  $J_{\max}/J_0$  существенно шире, чем в сердцевине РП:  $\sim 0.03-1000$  и  $\sim 0.1-50$  соответственно (рис. 4б). Соотношения между величинами  $J_{\max}$  и  $J_0$  по данным КА VAP и ИСЗ GOES для одних и тех же бурь, как правило, соответствуют друг другу. Однако в 5 событиях из 22 динамика потоков электронов на ГСО и в сердцевине РП не совпадает: для этих бурь величина  $(J_{\max}/J_0 - 1)$  имеет разный знак в максимуме пояса и на ГСО (рис. 4б). Эти события показывают, что в сердцевине и на внешнем краю радиационного пояса преобладающими могут быть разные процессы потерь и ускорения электронов. В ряде случаев в ходе умеренных магнитных бурь мы можем наблюдать противоположную динамику внешнего электронного пояса на внутренних и на внешних L-оболочках.

Для сильных геомагнитных возмущений потоки электронов в сердцевине РП и на ГСО демонстрируют одинаковое поведение: после сильных бурь с  $|Dst|_{\max} \sim > 120$  нТл поток на фазе восстановления превышает добуревой уровень. Следует отметить, что исследовались бури, которые произошли в период функционирования КА VAP. Аналогичное исследование отношения  $J_{\max}/J_0$ ,



**Рис. 4.** Зависимость от максимального за время бури значения модуля  $Dst$ -вариации величины отношения: (а) — потока электронов на фазе восстановления бури к потоку до бури в максимуме РП по данным КА VAP; (б) — потока электронов на фазе восстановления бури к минимальному потоку в дневном секторе ГСО по данным ИСЗ GOES; (в) — соотношение величин  $J_{\max}/J_0$  по данным КА VAP и GOES для одних и тех же бурь. Тонкие линии —  $J_{\max}/J_0 = 1$ .

проведенное по данным ИСЗ GOES для мощных геомагнитных бурь в период до 2012 года, показало, что на ГСО  $J_{\max}/J_0$  может быть меньше 1 и во время сильных бурь с  $|Dst|_{\max} > 120$  нТл (например, буря 25.10.2011 г.). Зависимость величины  $J_{\max}/J_0$  от интенсивности бури требует дополнительного изучения.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ

Магнитное поле в магнитосфере Земли управляется движением заряженных частиц. Разработанные теории позволяют объяснить формирование и динамику плазменных образований и популяций захваченных электронов и ионов в магнитосфере под контролем магнитного поля (напри-

мер, [McIlwain, 1966; Тверской, 2004]). В свою очередь, в результате массовых перемещений популяций заряженных частиц в магнитосфере формируются электрические токи, которые приносят изменения в структуру магнитосферы, особенно заметные в ходе геомагнитных возмущений (например, [Alexeev et al., 2001]). Наиболее ярким результатом влияния потоков заряженных частиц на состояние магнитосферы является сильная депрессия магнитного поля во время магнитной бури вследствие формирования кольцевого тока.

Экспериментальное подтверждение зависимости динамики потока релятивистских электронов внешнего радиационного пояса Земли от вариаций магнитного поля во время бурь было

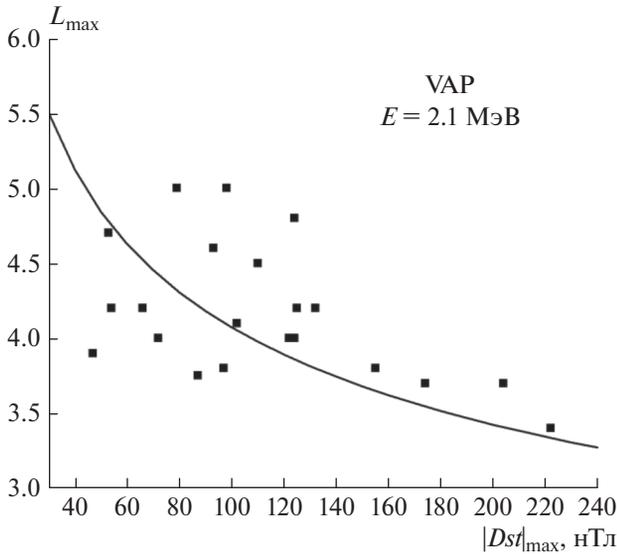


Рис. 5. Зависимость положения по  $L$ -параметру максимума потока электронов внешнего РП на фазе восстановления бури по данным КА VAP (точки) от максимального за время бури значения модуля  $Dst$ -вариации. Линия — эмпирическая зависимость (1) [Тверская, 1986].

впервые представлено в работе [Тверская, 1986]. По данным низковысотных полярных спутников была получена зависимость положения максимума пояса инжектированных во время магнитных бурь релятивистских электронов ( $L_{\max}$ ) от максимальной амплитуды магнитной бури:

$$|Dst|_{\max} = 2.75 \times 10^4 L_{\max}^4. \quad (1)$$

Б.А. Тверской [1997] сделал расчет структуры кольцевого тока во время геомагнитной бури и теоретически обосновал эмпирическую зависимость (1). В работе [Тверской, 1997] показано, что в максимуме бури при наибольшем значении  $|Dst|_{\max}$  в области  $L_{\max}$  следует ожидать максимального давления плазмы кольцевого тока, что соответствует границе области инжекции. В работе [Калегаев и Власова, 2017] по данным низковысотных ИСЗ РОЕС получено хорошее согласие с эмпирической формулой (1) зависимости от  $|Dst|_{\max}$  положения максимума потока высыпавшихся ионов, которые, как показано в работе [Søgaard et al., 2002], являются индикатором, характеризующим интенсивность инжекции частиц из хвоста магнитосферы.

КА VAP — приэкваториальные спутники, регистрирующие потоки электронов непосредственно в сердцевине РП. По данным с КА VAP для 22 геомагнитных бурь (таблица 1) построена зависимость от интенсивности бури (амплитуды  $Dst$ -вариации) положения по  $L$ -параметру максимума потоков электронов с энергией 2.1 МэВ внешнего РП на фазе восстановления бури (рис. 5).

В работе [Tverskaya et al., 2003] были сформулированы основные необходимые условия для анализа положения  $L_{\max}$  из выражения (1): буря должна быть изолированной, чтобы избежать множественных инжекций и быстрых переносов электронов в результате последующей бури, близкой по времени; должно быть существенное возрастание интенсивности электронов от предбуревого уровня; необходимо исключить случаи “ударной” инжекции в момент  $SC$ ; должна учитываться возможность дополнительных инжекций на фазе восстановления бури, которая может дать большее возрастание, нежели инжекция от “основной” бури. Экспериментальные точки на рис. 5 относятся к 22 бурям (табл. 1), которые никаким образом не были отобраны. Поэтому все описанные выше возможности, вносящие отклонения от зависимости (1), могли иметь место. Но, несмотря на это, можно видеть, что для сильных бурь с  $|Dst|_{\max} \sim \geq 120$  нТл экспериментальные точки достаточно хорошо согласуются с зависимостью (1).

Аналогичные зависимости  $L_{\max}$  от  $|SYM-H_{\min}|$  по 78 бурям по данным КА VAP представлены в работе [Moysa et al., 2017]. Все бури были разделены на три класса по величине отношения потока на фазе восстановления к добуревому уровню значения потока: без изменения, уменьшение, увеличение. Сделан вывод, что для бурь с возрастанием потока электронов на фазе восстановления экспериментальные точки согласуются с эмпирической зависимостью (1), в то время как для других бурь такой корреляции нет, что полностью согласуется с условиями отбора событий, сформулированными и используемыми в работе [Tverskaya et al., 2003].

Мы исследовали относительную динамику потоков электронов внешнего радиационного пояса на разных фазах геомагнитных бурь разной интенсивности. Результаты проведенного исследования свидетельствуют, что на фазе восстановления сильных магнитных бурь с  $|Dst|_{\max} \sim \geq 120$  нТл расстояние до максимума внешнего электронного пояса ( $L_{\max}$ ) зависит от интенсивности бури (рис. 5) и может быть аппроксимировано выражением (1), а соотношение  $J_{\max}$  и  $J_{\min}$  для сердцевинного РП увеличивается с ростом интенсивности бури (рис. 3а). Совокупность этих результатов, как и приведенные выше выводы работы [Moysa et al., 2017], могут быть интерпретированы как свидетельство того, что потоки электронов внешнего РП на фазе восстановления сильных бурь определяются глобальными вариациями магнитосферного магнитного поля, связанными с развитием магнитосферных токовых систем. Аналогичный анализ, проведенный для главной фазы сильных бурь, показывает, что в сердцевине РП отношение  $J_{\min}$  к  $J_0$  уменьшается с усилением бури (рис. 2а).  $\lg(J_{\min}/J_0)$  можно аппроксимировать линейной

функцией, зависящей от максимальной буревой депрессии магнитосферного магнитного поля ( $-|Dst|_{\max}/60 + 1/2$ ). Можно заключить, что вариации магнитосферного магнитного поля во время сильных бурь являются главным фактором, определяющим динамику потоков релятивистских электронов внешнего РП Земли, как на главной фазе бури, так и на фазе восстановления.

На главной фазе бури вследствие понижения северо-южной компоненты магнитного поля во внутренних областях магнитосферы потоки электронов смещаются на удаленные  $L$ -оболочки. Восстановление поля возвращает электроны обратно, внутрь РП. В работе [Тверская, 2011] сделано предположение, что основным резервуаром, из которого электроны переносятся вглубь радиационного пояса, является область ночной магнитосферы за границей области захваченной радиации — “зона нерегулярных потоков электронов”. Перемещения популяций энергичных электронов, сопровождающиеся изменением их энергии под воздействием бетатронного механизма, могут объяснить быстрые буревые адиабатические вариации внешнего радиационного пояса. Следует обратить внимание, что после бури магнитосфера переходит в стационарное состояние, которое не обязательно соответствует добуревому. В этом случае структура магнитосферы изменяется, и даже при адиабатическом развитии РП в нем могут наблюдаться потоки электронов отличные от тех, что были до бури.

Наряду с этим, на фоне глобальных изменений в радиационном поясе, несомненно, присутствуют конкурирующие локальные процессы, приводящие, как к потерям, так и к ускорению частиц. В работе [Reeves et al., 2013] исследовалась динамика внешнего пояса в ходе умеренной магнитной бури 08–09.IX.2012 (событие 1 в табл. 1) с превышением потока электронов на фазе восстановления по сравнению с добуревым уровнем. Показано, что радиальные профили плотности в фазовом пространстве, построенные по экспериментальным данным с КА Van Allen Probes, свидетельствуют о наличии локального ускорения во внешнем электронном поясе Земли. Разброс экспериментальных значений изменения потоков (рис. 2а и 3а) и положения максимума пояса (рис. 5) во время геомагнитных бурь с  $|Dst|_{\min} \sim < 120$  нТл в сердцевине РП, а также для всех бурь на ГСО (рис. 2б и 3б) свидетельствуют о возможном воздействии других механизмов, наряду с вариациями геомагнитного поля. Кроме того, слабые бури затрагивают, главным образом, периферийные области внешнего РП. На потоки электронов в области ГСО более сильное влияние оказывают процессы реальных потерь и ускорения частиц, что, конечно, должно отразиться на полученных экспериментальных результатах

(рис. 2б и 3б). Что касается сердцевины РП, где располагается максимум пояса релятивистских электронов, то можно видеть, что падение потока релятивистских электронов на главной фазе бури демонстрирует четко выраженную тенденцию зависимости от интенсивности бури во всем диапазоне  $|Dst|_{\max}$  (рис. 2а). Можно предположить, что процессы реальных потерь изменяют поток частиц в этой области, но являются менее существенными, чем зависимость от вариаций магнитного поля. На фазе восстановления общая тенденция также сохраняется (рис. 3а), но разброс экспериментальных точек для слабых и умеренных бурь увеличивается, что можно интерпретировать, как вклад процессов ускорения, а также перенос частиц из хвоста магнитосферы за счет других механизмов. Одним из таких механизмов является дрейф частиц в скрепленных геомагнитном и электрическом полях. При этом электрическое поле в хвосте магнитосферы генерируется в результате взаимодействия солнечного ветра с геомагнитным полем и пропорционально ( $-B_z V_{sw}$ ), где  $B_z$  — южная компонента межпланетного магнитного поля, а  $V_{sw}$  — скорость солнечного ветра [Alexeev et al., 1993].

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты исследования динамики потоков релятивистских электронов с энергией  $\sim 2$  МэВ внешнего радиационного пояса Земли во время 22 геомагнитных бурь в 2012–2019 гг. по экспериментальным данным с КА VAP и ИСЗ GOES. Сделан вывод, что доминирующее влияние на динамику релятивистских электронов внешнего радиационного пояса Земли во время сильных магнитных бурь с  $|Dst|_{\max} \sim \geq 120$  нТл оказывают глобальные изменения магнитосферного магнитного поля, приводящие к адиабатическим вариациям потоков релятивистских электронов.

Для бурь с  $|Dst|_{\min} \sim < 120$  нТл в сердцевине радиационного пояса воздействие вариаций магнитного поля на динамику потоков релятивистских электронов на главной фазе бури является доминирующим фактором, в то время как на фазе восстановления наряду с вариациями магнитосферного магнитного поля оказывается существенным и влияние процессов реальных потерь и других механизмов переноса и ускорения частиц. Для области геостационарной орбиты зависимости динамики потока релятивистских электронов от вариаций магнитосферного магнитного поля не обнаружено, что может быть связано с одновременным и равнозначным действием различных физических механизмов.

## 6. БЛАГОДАРНОСТИ

Данные по геомагнитному индексу получены в World Data Center C2 for Geomagnetism, Kyoto. Экспериментальные данные измерений КА Van Allen Probes и ИСЗ GOES-15 получены в NASA/GSFC Space Physics Data Facility (SPDF), CDAWeb (the Coordinated Data Analysis Web) (<https://cdaweb.sci.gsfc.nasa.gov>).

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 19-05-00960.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Власова Н.А., Калегаев В.В., Назарков И.С., Прост А. Вариации магнитного поля и динамика внешнего электронного радиационного пояса магнитосферы Земли в феврале 2014 г. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 60. № 1. С. 9–22. 2020.  
<https://doi.org/10.31857/S0016794020010149>
- Калегаев В.В., Власова Н.А. Относительная динамика кольцевого тока – токов хвоста магнитосферы во время геомагнитных бурь разной интенсивности // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 57. № 5. С. 572–577. 2017.  
<https://doi.org/10.7868/S0016794017040083>
- Калегаев В.В., Власова Н.А., Пенг Ж. Динамика магнитосферы во время геомагнитных бурь 21–22.I.2005 и 14–15.XII.2006 г. // Космич. исслед. Т. 53. № 2. С. 105–117. 2015.  
<https://doi.org/10.7868/S002342061502003X>
- Павлов Н.Н., Тверская Л.В., Тверской Б.А., Чучков Е.А. Вариации энергичных частиц радиационных поясов во время сильной магнитной бури 24–26 марта 1991 г. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 33. № 6. С. 41–45. 1993.
- Тверская Л.В. О границе инжекции электронов в магнитосферу Земли // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 26. С. 864–865. 1986.
- 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.
- Тверской Б.А. Динамика радиационных поясов Земли. М.: Наука, 224 с. 1968. (Основы теоретической космофизики. Избранные труды. М.: УРСС. 336 с. 2004.)
- Тверской Б.А. Механизм формирования структуры кольцевого тока магнитных бурь // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 37. № 5. С. 29–34. 1997.
- Alexeev I.I., Belenkaya E.S., Kalegaev V.V., Lutov Yu.G. Electric fields and field-aligned current generation in the magnetosphere // J. Geophys. Res. V. 98. № A3. P. 4041–4051. 1993.
- Alexeev I.I., Kalegaev V.V., Belenkaya E.S. et al. The Model Description of Magnetospheric Magnetic Field in the Course of Magnetic Storm on January 9–12, 1997 // J. Geophys. Res. V. 106. № A11. P. 25683–25694. 2001.
- Anderson B.R., Millan R.M., Reeves G.D., Friedel R.H.W. Acceleration and loss of relativistic electrons during small geomagnetic storms. // Geophysical Research Letters. V. 42. № 23. P. 10113–10119. 2015.  
<https://doi.org/10.1002/2015GL066376>
- Antonova E.E., Stepanova M.V., Moya P.S., Pinto V.A., Vovchenko V.V., Ovchinnikov I.L., Sotnikov N.V. Processes in auroral oval and outer electron radiation belt // Earth, Planets and Space. V. 70. P. 127–137. 2018.  
<https://doi.org/10.1186/s40623-018-0898-1>
- Baker D.N., Erickson P.J., Fennell J.F., Foster J.C., Jaynes A.N., Verronen P.T. Space Weather Effects in the Earth's Radiation Belts // Space Sci. Rev. V. 214. № 17. P. 1–60. 2018.  
<https://doi.org/10.1007/s11214-017-0452-7>
- Blake J.B., Baker D.N., Turner N., Ogilvie K.W., Lepping R.P. Correlation of changes in the outer-zone relativistic electron population with upstream solar wind and magnetic field measurements // Geophys. Res. Lett. V. 24. № 8. P. 927–929. 1997.  
<https://doi.org/10.1029/97GL00859>
- Friedel R.H., Reeves W.G.P., Obara T. Relativistic electron dynamics in the inner magnetosphere – A review // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 64. P. 265–282. 2002.  
[https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(01\)00088-8](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(01)00088-8)
- Georgiou M., Daglis I.A., Rae I.J. et al. Ultra-low frequency waves as an intermediary for solar wind energy input into the radiation belts // Journal of Geophysical Research // Space Physics. V. 123. P. 10.090–10.108. 2018.  
<https://doi.org/10.1029/2018JA025355>
- 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. V. 110. P. A03225. 2005.  
<https://doi.org/10.1029/2004HA010811>
- Kalegaev V., Panasyuk M., Myagkova I. et al. Monitoring analysis and post-casting of the Earth's particle radiation environment during February 14–March 5, 2014 // J. Space Weather and Space Climate. V. 9. C. A29. 2019.  
<https://doi.org/10.1051/swsc/2019029>
- Lazutin L.L., Dmitriev A.V., Suvorova A.V. Electron radiation belt dynamics during magnetic storms and in quiet time // Solar-Terrestrial Physics. V. 4. № 1. P. 51–60. 2018.  
<https://doi.org/10.12737/stp-41201805>
- Lyatsky W., Khazanov G.V. Effect of solar wind density on relativistic electrons at geosynchronous orbit // Geophys. Res. Lett. V. 35. P. L03109. 2008.  
<https://doi.org/10.1029/2007GL032524>
- Mauk B.H., Fox N.J., Kanekal S.G., Kessel R.L., Sibeck D.G., Ukhorskiy A. Science objectives and rationale for the Radiation Belt Storm Probes mission // Space Sci. Rev. V. 179. P. 3–27. 2013.  
<https://doi.org/10.1007/s11214-012-9908-y>
- McIlwain C.E. Ring current effects on trapped particles // J. Geophys. Res. V. 71. P. 3623–3628. 1966.
- 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.: Space Physics, V. 122. P. 11.100–11.108. 2017.  
<https://doi.org/10.1002/2017JA024735>
- Newell P.T., Sotirelis T., Liou K., Meng C.-I., Rich F.J. A nearly universal solar wind-magnetosphere coupling function inferred from 10 magnetospheric state variables. //

- J. Geophys. Res. V. 112. A01206. 2007.  
<https://doi.org/10.1029/2006JA012015>
- Paulikas G.A., Blake J.B. Effects of the solar wind on magnetospheric dynamics: Energetic electrons at the synchronous orbit, in Quantitative Modeling of Magnetospheric Processes // Geophys. Monogr. Ser. V. 21. P. 180–186. 1979.
- Reeves G.D., McAdams K.L., Friedel R.H.W., O'Brien T.P. Acceleration and loss of relativistic electrons during geomagnetic storms // Geophys. Res. Lett. V. 30. № 10. P. 1529–1564. 2003.  
<https://doi.org/10.1029/2002GL016513>
- Reeves G.D., Spence H.E., Henderson M.G. et al. Electron Acceleration in the Heart of the Van Allen Radiation Belts // Science. V. 341. P. 991–994. 2013.  
<https://doi.org/10.1126/science.1239879>
- 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. V. 70. P. 1694–1713. 2008.  
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2008.06.014>
- Søraas F., Aarsnes K., Oksavik K., Evans D.S. Ring current intensity estimated from low-altitude proton observations // J. Geophys. Res. V. 107. № A7. P. 1149–1859. 2002.  
<https://doi.org/10.1029/2001JA000123>
- Spence H.E., Reeves G.D., Baker D.N. et al. Science goals and overview of the energetic particle, composition, and thermal plasma (ECT) suite on NASA's radiation belt storm probes (RBSP) mission // Space Sci. Rev. P. 311–336. 2013.  
<https://doi.org/10.1007/s11214-013-0007-5>
- Turner D.L., Shprits Y., Hartinger M., Angelopoulos V. Explaining sudden losses of outer radiation belt electrons during geomagnetic storms // Nat. Phys. V. 8. P. 208–212. 2012.  
<https://doi.org/10.1038/nphys2185>
- Tverskaya L.V., Pavlov N.N., Blake J.B., Selesnick R.S., Fennell J.F. Predicting the L-position of the storm-injected relativistic electron belt // Adv. Space Res. V. 31. № 4. P. 1039–1044. 2003.
- Ukhorskiy A.Y., Anderson B.J., Brandt P.C., Tsyganenko N.A. Storm time evolution of the outer radiation belt: transport and losses // J. Geophys. Res. Space Phys. V. 111. P. A11S03. 2006.  
<https://doi.org/10.1029/2006JA011690>
- Vernov S.N., Chudakov A.E., Vakulov P.V., Logachev Yu I. Radiation measurement during the flight of the second Soviet space rocket // Proc. First Intern. Space Science Symposium (Space Research). Amsterdam: North-Holland. C. 845–851. 1960.
- 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. V. 119. P. 3325–3332. 2014.  
<https://doi.org/10.1002/2014JA019822>
- Zhao H., Baker D.N., Jaynes A.N., Li X., Elkington S.R., Kanekal S.G., Spence H.E., Boyd A.J., Huang C.-L., Forsyth C. On the relation between radiation belt electrons and solar wind parameters/geomagnetic indices: dependence on the first adiabatic invariant and  $L^*$  // J. Geophys. Res. V. 122. № 2. P. 1624–1642. 2017.  
<https://doi.org/10.1002/2016JA023658>