

УДК 550.385

ВАРИАЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ДИНАМИКА ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРОННОГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ В ФЕВРАЛЕ 2014 г.

© 2020 г. Н. А. Власова^{1, *}, В. В. Калегаев¹, И. С. Назарков¹, А. Прост²

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

²Институт аэронавтики и космонавтики, г. Тулуза, Франция

*e-mail: nav19iv@gmail.com

Поступила в редакцию 18.04.2019 г.

После доработки 06.06.2019 г.

Принята к публикации 26.09.2019 г.

Представлены результаты сравнительного анализа динамики потоков релятивистских электронов внешнего радиационного пояса Земли и кольцевого тока и вариаций геомагнитного поля 15–22.02.2014 г. по экспериментальным данным, полученным в сердцевине радиационных поясов на ИСЗ Van Allen Probes и на геостационарной орбите на ИСЗ GOES-15. С использованием параболической модели магнитосферы A2000 выполнены расчеты вкладов основных токовых систем в *Dst*-вариацию. Рассмотрено влияние внешних факторов – солнечного ветра и межпланетного магнитного поля. Результаты сопоставления динамики потоков электронов на разных орбитах и вариаций геомагнитного поля 15–22.02.2014 г. позволяют сделать вывод о том, что основными механизмами эволюции внешнего электронного радиационного пояса являются глобальные процессы: перемещение популяции захваченных электронов наружу и внутрь магнитосферы Земли вследствие крупномасштабных вариаций магнитосферного магнитного поля во время геомагнитных возмущений и дрейф электронов из хвоста магнитосферы под воздействием электрического и магнитного полей. Локальное ускорение частиц носит вспомогательный характер в динамике радиационных поясов. Южная ориентация межпланетного магнитного поля является необходимым условием для роста интенсивности потоков электронов внешнего радиационного пояса Земли, а функция $(-B_z V_{sw})$ – ключевым внешним фактором.

DOI: 10.31857/S0016794020010149

1. ВВЕДЕНИЕ

Радиационные пояса Земли были открыты более полувека назад (1958 г.): внутренний – Джеймсом Ван Алленом (ИСЗ Explorer-1) и внешний – С.Н. Верновым (ИСЗ Спутник-2). В настоящее время общепринятой точки зрения на источники динамики внешнего электронного радиационного пояса не существует (см., например, обзор [Baker et al., 2018] и ссылки в нем). Согласно работам [Тверской, 1968, 2004] среди основных механизмов формирования внешнего электронного радиационного пояса наиболее важными являются: магнитная диффузия в индукционных полях, возникающих при внезапных импульсах геомагнитного поля; радиальная диффузия под воздействием нестационарных электрических полей; высывания и ускорение частиц при взаимодействии с волнами; потери электронов во время движения магнитопаузы; захват и возможное бетатронное ускорение частиц во время диполизации геомагнитного поля.

Магнитная диффузия является механизмом, который объясняет развитие диффузионных волн релятивистских электронов в промежутке между бурями [Тверской, 1968, 2004]. В рамках теории дрейфа частиц в электрическом и магнитных полях предложен механизм “ударной” инжекции частиц под воздействием биполярного внезапно-го импульса геомагнитного поля [Павлов и др., 1993]. Наиболее сильные вариации внешнего электронного радиационного пояса происходят во время геомагнитных возмущений. Обычно потоки электронов падают на главной фазе бури, в то время как дальнейшее развитие событий не предсказуемо: в ~50% случаев потоки возрастают, но могут либо не восстановиться, либо вернуться к предбуревому уровню [Reeves et al., 2003].

“Буревая” инжекция – наиболее признанный механизм, который предусматривает двухэтапное ускорение электронов в процессе суббуревой активности и в результате резонансного взаимодействия с волнами, для ускорения требуется две по-

пуляции частиц — ~ 10 кэВ и ~ 100 кэВ, (например, обзор [Baker et al., 2018] и ссылки в нем). Влияние внешних факторов на динамику потоков электронов — важнейший аспект исследований. Обнаружена сильная корреляция потоков релятивистских электронов со скоростью солнечного ветра [Paulikas and Blake, 1979]. В работе [Blake et al., 1997] показано, что потоки электронов с $E > 2$ МэВ на геостационарной орбите коррелируют с увеличением плотности и скорости солнечного ветра, а рост потоков электронов внешнего пояса связан с переориентацией к югу межпланетного магнитного поля (ММП). В то же время Lyatsky and Khazanov [2008] показали, что потоки энергичных электронов антикоррелируют с плотностью солнечного ветра. Результаты статистического исследования динамики внешнего электронного пояса по данным ИСЗ Van Allen Probes методом наложения эпох свидетельствуют о трех наиболее важных условиях для роста потока электронов: длительная южная ориентация ММП, высокая скорость и низкое давление солнечного ветра [Li et al., 2015].

Одним из ключевых вопросов является роль адиабатических эффектов в динамике внешнего радиационного пояса. При относительно медленных изменениях магнитосферного магнитного поля вариации внешнего радиационного пояса происходят при сохранении адиабатических инвариантов. При этом спутниками регистрируются изменения потоков электронов, которые не связаны с реальными потерями или с реальным поступлением новых частиц во внутреннюю магнитосферу. С другой стороны, питч-угловое рассеяние частиц, быстрые движения магнитопаузы под воздействием импульсов давления солнечного ветра, приводят к безвозвратным потерям электронов, которые компенсируются поступлением новых частиц, ускоренных суббуревыми процессами и взаимодействием волна-частица (например, обзор [Baker et al., 2018] и ссылки в нем).

Функция плотности фазового пространства помогает дать оценку относительной роли адиабатических и неадиабатических механизмов развития радиационных поясов. С использованием этого математического аппарата в работе [Zhao et al., 2017] показано, что роль адиабатических эффектов в динамике внешнего электронного радиационного пояса незначительна. С другой стороны, в работе [Lazutin et al., 2018] показано, что главной причиной уменьшения потока релятивистских электронов во внешнем радиационном поясе на главной фазе геомагнитной бури является именно адиабатическое охлаждение, связанное с депрессией магнитного поля во внутренней магнитосфере при сохранении адиабатических инвариантов.

Магнитосфера Земли — самосогласованная система, основными компонентами которой являются геомагнитное поле и заряженные частицы. Динамика потоков заряженных частиц определяется структурой магнитного поля. Движения частиц, в свою очередь, создают токи, изменяющие величину магнитного поля. Из этого следует естественный вывод о том, что одним из основных факторов, определяющих динамику потоков заряженных частиц в магнитосфере, являются вариации геомагнитного поля. В работе [Тверская, 1986] представлена зависимость положения максимума пояса электронов от максимальной амплитуды Dst -вариации бури: $|Dst|_{\max} = 2.75 \times 10^4 / L_{\max}^4$. Зависимость была получена эмпирическим путем по данным низколетящих полярных спутников. Теоретическая интерпретация зависимости состоит в том, что в точке L_{\max} , из описанной выше зависимости, находится максимум плотности кольцевого тока [Тверской, 1997]. В работе [Антонова и др., 2017] показано, что авроральные процессы во время суббуревой активности могут приводить к дополнительному уменьшению магнитного поля в экваториальной магнитосфере в области максимального давления плазмы, способствующему адиабатическому ускорению низко-энергичных электронов (*seed*-популяции).

Целью представленной работы является попытка интерпретации наблюдаемой динамики потоков электронов внешнего радиационного пояса Земли 15–22.02.2014 г. адиабатическими и неадиабатическими вариациями, обусловленными глобальными изменениями магнитного поля основных токовых систем магнитосферы Земли в условиях воздействия различных факторов межпланетной среды.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

В работе использованы экспериментальные данные, полученные с ИСЗ GOES-15 с прибора SEM (Space Environment Monitor) с геостационарной орбиты (ГСО) (<http://www.ngdc.noaa.gov/stp/satellite/goes>) и с космических аппаратов (КА) Van Allen Probes (VAP), первое название миссии — Radiation Belt Storm Probes (RBSP), (<http://vanallenprobes.jhuapl.edu>). КА VAP — 2 идентичных спутника (*a* и *b*) на высокоэллиптической орбите: наклонение — 10° ; период обращения — 9 ч; апогей $\sim 6 R_E$; перигей ~ 600 – 700 км. В феврале 2014 г. орбита КА VAP находилась в дневном секторе магнитосферы (рис. 1 — (<http://rbspgway.jhuapl.edu/ExtendedMissionOrbit>)).

Ось вращения КА VAP стабилизирована и направлена на Солнце. В представленной работе использованы усредненные по углам данные приборов HOPE (Helium Oxygen Proton Electron)

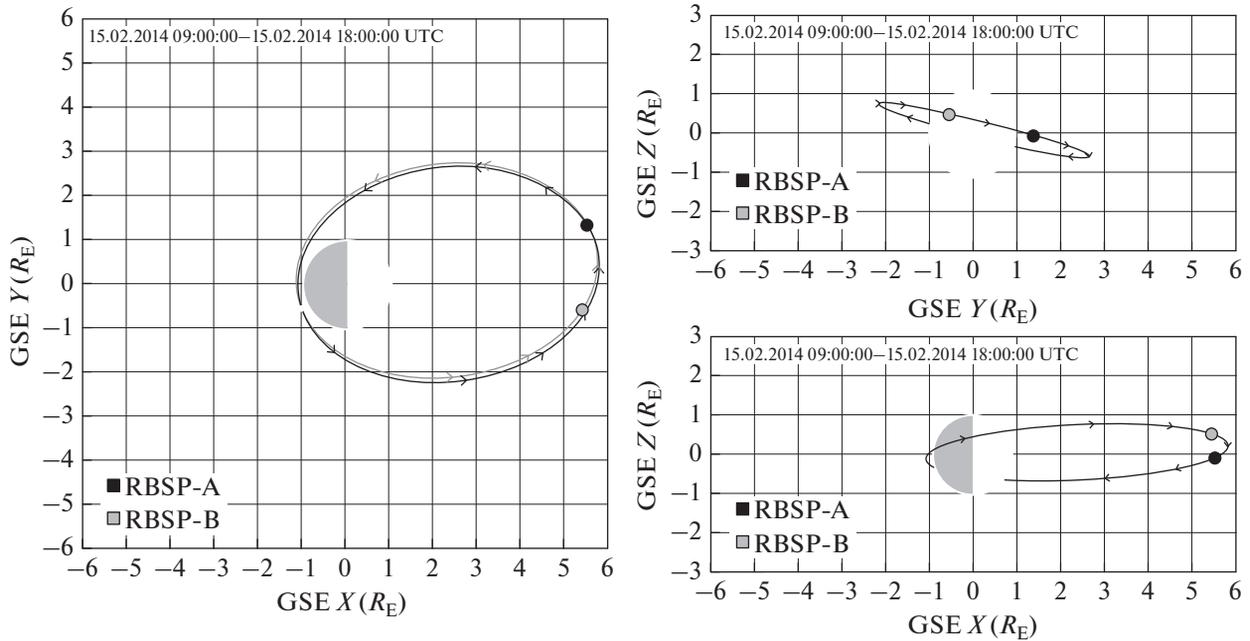


Рис. 1. Орбиты спутников VAP 15.02.2014 г.

и MagEIS (The Magnetic Electron Ion Spectrometer), входящих в аппаратуру ECT (Energetic Particle, Composition, and Thermal Plasma Suite) [Spence, et al. 2013].

Для исследования воздействия межпланетной среды на магнитосферу Земли использованы экспериментальные данные о солнечном ветре и ММП, полученные на КА ACE, расположенном в точке либрации $L1$ на расстоянии 1.5 млн км от Земли к Солнцу (www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/).

Геомагнитная активность магнитосферы Земли характеризовалась Dst -вариацией и $SYM-H$, $ASY-H$ и AL -индексами (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>).

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Период с 15–22.02.2014 г. может быть полезным для понимания динамики потоков релятивистских электронов внешнего радиационного пояса Земли, поскольку наблюдались эффекты различных физических процессов, происходящих в магнитосфере. 15–16.02.2014 потоки релятивистских электронов на ГЕО продемонстрировали падение примерно на два порядка величины (рис. 2) несмотря на то, что классической геомагнитной бури не произошло. Похожую динамику электронов можно видеть и в сердцевине радиационных поясов (рис. 3). Профиль потока электронов с энергией 2.1 МэВ по данным КА VAPa (при пролете между L -оболочками от 6 до 3) утром 15.02.2014 г. представлен на рис. 3а. Для периода 15–22.02.2014 г. определены величины максимальных потоков для каждого пролета КА VAPa

через область внешнего радиационного пояса и положения максимумов по L . Временные профили этих параметров представлены на рис. 3б и 3в, соответственно. Можно видеть, что 16.02.2014 г., когда магнитосфера Земли испытала сильный импульс давления солнечного ветра (рис. 2), наблюдалось смещение максимума пояса к Земле (рис. 3в) и уменьшение интенсивности потока (рис. 3б). Восстановления по окончании воздействия импульса давления не произошло. Поток электронов с $E > 2$ МэВ на ГСО также практически не восстанавливался в течение четырех дней, несмотря на сильную геомагнитную бурю 19.02.2014 г., связанную с достаточно длительным периодом южной ориентации ММП с большой величиной B_z -компоненты (рис. 2). 21.02.2014 г. потоки электронов $E > 2$ МэВ на ГСО не только восстановились, но и превысили уровень 15.02.2014 г.. Похожая динамика потоков электронов наблюдалась и в сердцевине радиационных поясов (рис. 3б).

Исследование динамики потоков релятивистских электронов на низковысотной полярной орбите по данным ИСЗ POES показало отсутствие существенных высываний потоков электронов с $E > 600$ кэВ (рисунки не приведены) в период 15–22.02.2014 г.

15–16 февраля 2014 г. магнитосфера Земли испытала воздействие импульса давления солнечного ветра (рис. 2). Постепенное поджатие магнитосферы происходило в течение нескольких часов вследствие прихода быстрой и плотной плазмы солнечного ветра в условиях северной ориентации ММП. Такое воздействие вызвало

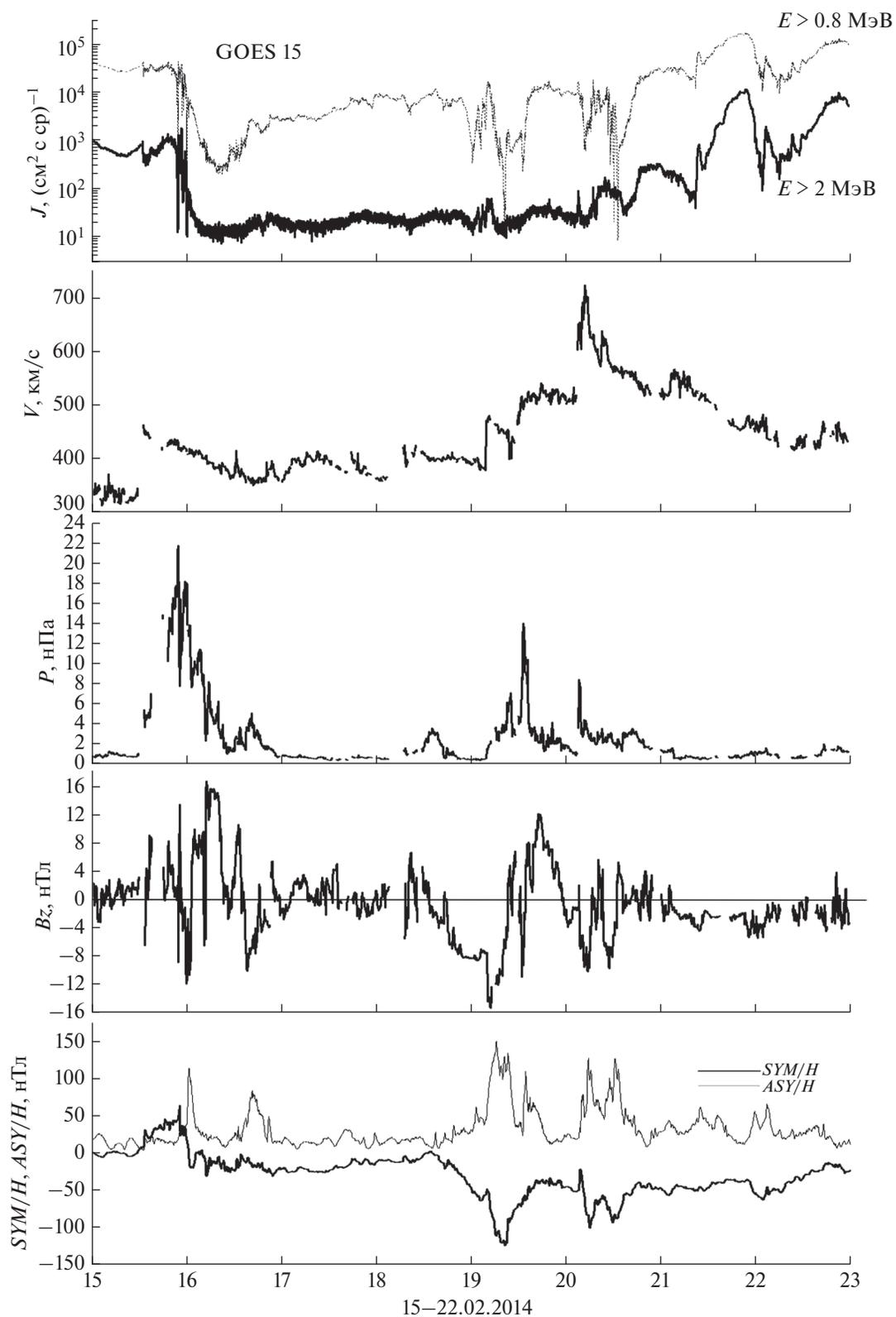


Рис. 2. Временные профили потоков электронов на ГСО, скорости (V) и давления солнечного ветра (P), B_z -компоненты ММП и SYM/H и ASY/H – индексов 15–22.02.2014 г.

усиление токов Чепмена–Ферраро на магнитопаузе и проявилось в положительном скачке Dst -вариации и симметричной составляющей геомагнитного индекса SYM/H (рис. 2). Потоки электронов на ГСО с приходом высокоскоростного потока солнечного ветра (~12 UT 15.02.2014 г.) незначительно уменьшились, но быстро восстановились (вертикальная штриховая линия 1 на рис. 4). Когда импульс давления солнечного ветра достиг максимума, произошли резкие кратковременные вариации давления, сопровождаемые сменой северо-южной ориентации солнечного ветра. В результате наблюдались пересечения магнитопаузы ГСО, о чем свидетельствуют резкие кратковременные провалы на временном профиле потоков электронов (рис. 4) и характерные изменения магнитного поля на орбите ГЕО по данным ИСЗ GOES-15 (рис. не приводится). Можно говорить об эффекте суммарного воздействия на магнитопаузу импульса давления и вариации ММП. В данном случае возможна реализация механизма потерь электронов на ГСО — уход за магнитопаузу. В то же время, можно видеть, вариации потока в период, когда наблюдались движения магнитопаузы (между пунктирными вертикальными линиями 2 и 3 на рис. 4), носили кратковременный характер на фоне плавного уменьшения, связанного с другим глобальным процессом.

КА VAP в феврале 2014 г. проходили через область внешнего электронного радиационного пояса в дневной магнитосфере (рис. 1). На рисунках 5а–5в показано несколько пространственно-временных профилей потоков частиц, измеренных на КА VAPa при пролете половины орбиты, между L -оболочками в перигее и в апогее. Для профилей, представленных на рис. 5а–5в, в табл. 1 указаны времена пролетов и направления движения КА, наружу или внутрь радиационных поясов. На рис. 5а семейство тонких кривых с максимумом на $R \sim 4.7$ соответствует профилям потоков с ~00:00 по ~19:30 UT 15.02.2014 г. (табл. 1). Подобие профилей свидетельствует о стабильности радиационного пояса в это время. Примерно в 22:23 UT 15 февраля (волнообразный профиль 1 — толстая кривая) КА летел внутрь радиационных поясов. На следующем пролете (профиль 2 на нижней панели — толстая кривая) КА летел наружу. Начиная с ~00 UT 16 февраля, можно видеть появление фронта частиц кольцевого тока, заполняющих область радиационных поясов из хвоста магнитосферы. Усиление и смещение внутрь кольцевого тока хорошо заметно на следующих витках (тонкие кривые). В это же время происходит перестройка внешнего электронного радиационного пояса (семейство тонких кривых с максимумом на $R \sim 3.7$ на верхней панели рис. 5а): сдвиг внутрь и уменьшение интенсивности потока в максимуме. В результате геомагнитного возмущения, связанного с импульсом давления сол-

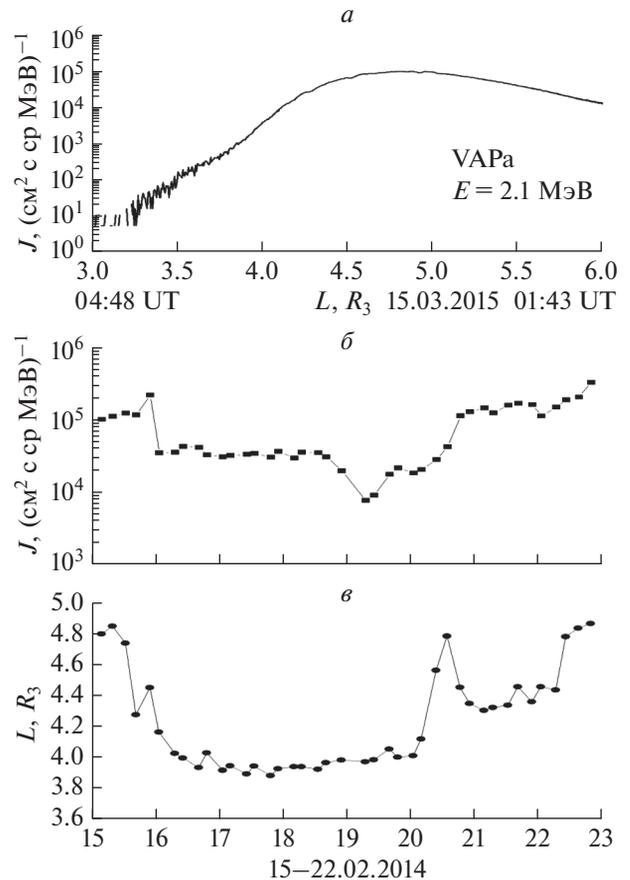


Рис. 3. Профиль потока электронов с $E = 2.1$ МэВ по данным КА VAPa 15.02.2014 г. (а), временные профили величины максимума потока электронов с $E = 2.1$ МэВ (б) и его положения по L (в) 15–22.02.2014 г.

нечного ветра во второй половине дня 15 февраля, в магнитосфере установилось новое стабильное состояние радиационного пояса с максимумом на $L \sim 3.7$, поддерживаемое сформировавшимся в начале 16 февраля кольцевым током.

19 февраля наблюдалась сильная геомагнитная буря с $|Dst|_{\text{max}} = 112$ нТл (рис. 2). Южная ориентация ММП во время главной фазы бури сменилась на северную на фазе восстановления. Изменения потока электронов с $E > 2$ МэВ на ГСО практически не произошло. В сердцевине радиационных поясов также особых отличий по сравнению с 16 февраля не наблюдалось (рис. 5б).

20 февраля к магнитосфере Земли пришел высокоскоростной поток солнечного ветра, вызвавший умеренную магнитную бурю с двумя фазами развития, связанными с поворотом ММП к югу (рис. 2). На рисунке 5в представлены пространственно-временные профили потоков электронов с $E = 2.1$ МэВ радиационных поясов 20–21.02.2014 г. Можно видеть, что эволюция радиационного пояса носила многоступенчатый харак-

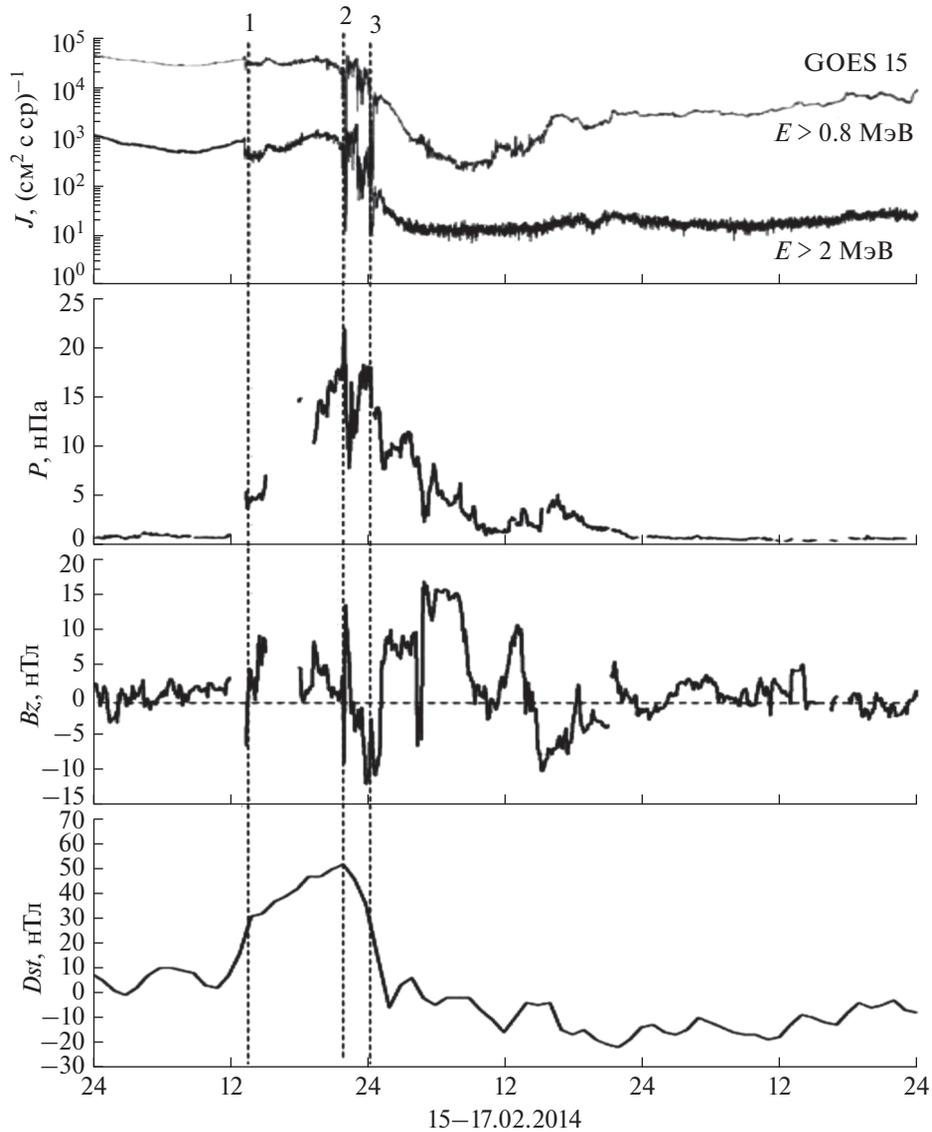


Рис. 4. Временные профили потоков электронов на ГЕО, давления солнечного ветра (P), B_z -компоненты ММП и Dst -вариации 15–17.02.2014 г.

тер. Восстановление потоков началось ранним утром 20 февраля с внешних L -оболочек ($R > 4.5$): на $L \sim 4.8$ наблюдается фронт инжекции электронов из хвоста (рис. 5в, толстая кривая 1, табл. 1). К ~ 15 UT потоки на геостационарной орбите возросли на порядок, внутренняя граница пояса сместилась с $L \sim 2.8$ до $L \sim 3$, максимум потока ($\sim 10^4$ (cm^2 с стер МэВ) $^{-1}$) сформировался на L -оболочке ~ 4.5 (толстая кривая 3). Следующим этапом развития пояса стало наполнение его внутренней части: примерно к 15 UT 21 февраля потоки в максимуме достигли $\sim 10^5$ (cm^2 с стер МэВ) $^{-1}$ на $L \sim 4.2$. К вечеру 21.02 (рис. 5в, тонкие кривые 4–5) изменения потоков электронов затронули и внешние L -оболочки ($R > 4.5$), после чего радиа-

ционный пояс окончательно восстановился до состояния первой половины дня 15.02.2014 г.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве механизмов пополнения внешнего электронного радиационного пояса рассматриваются два класса процессов: перенос и ускорение частиц от источника, расположенного вне радиационных поясов (радиальное ускорение) и ускорение низко-энергичных электронов до релятивистских энергий непосредственно в сердцевине радиационных поясов (локальное ускорение) [Reeves et al., 2015]. Основным резервуаром, из которого электроны переносятся вглубь радиационного пояса, является область ночной магнито-

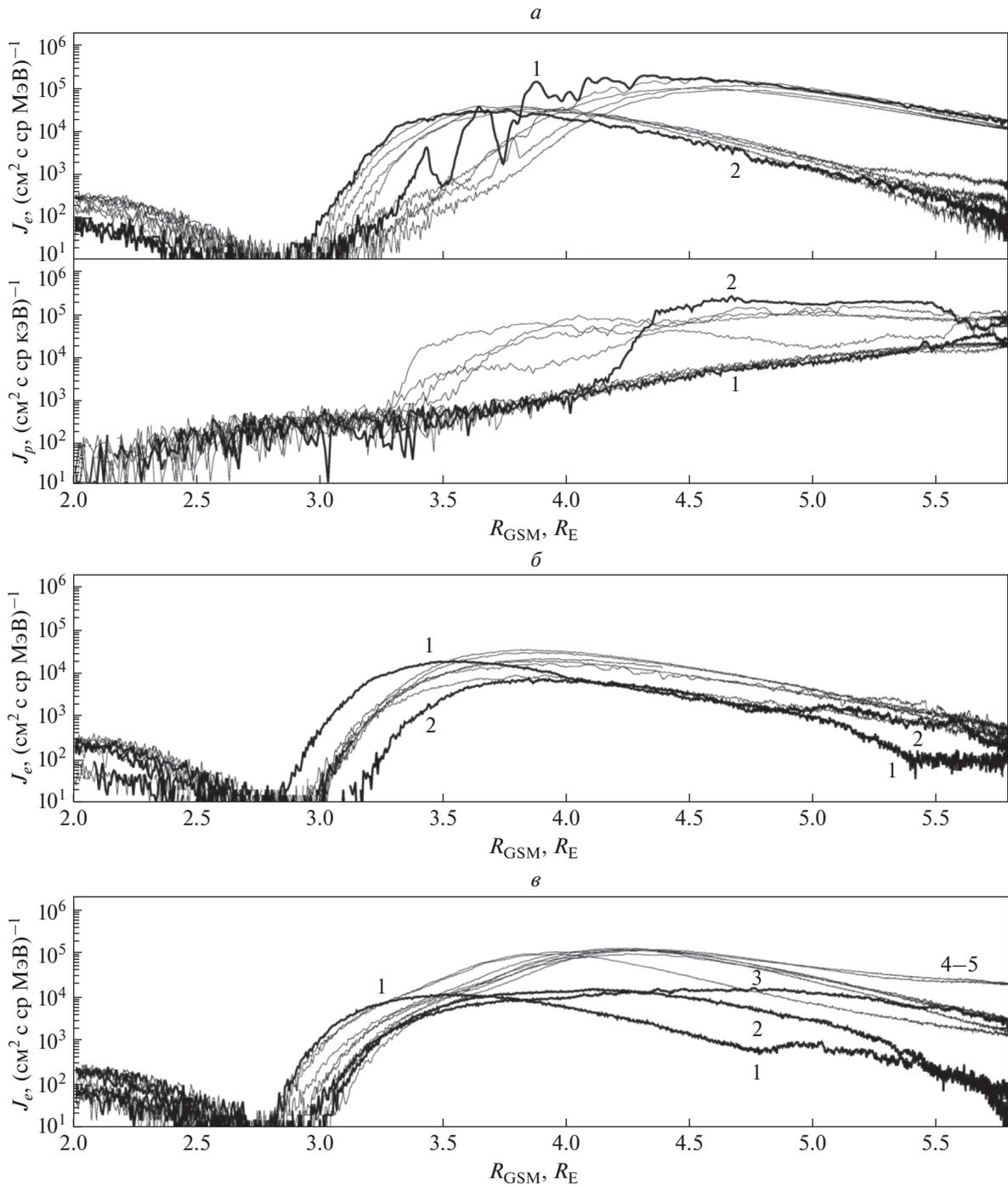


Рис. 5. Пространственно-временные профили потоков электронов с $E = 2.1$ МэВ радиационных поясов (верхняя панель) и потоков ионов кольцевого тока с $E = 51.8$ кэВ (нижняя панель) 15–16.02.2014 г. (а); пространственно-временные профили потоков электронов с $E = 2.1$ МэВ радиационных поясов 18–19.02.2014 г. (б) и 20–21.02.2014 г. (в) (подробности в тексте).

сферы за границей области захваченной радиации (“зона нерегулярных потоков электронов” [Тверская, 2011]). Для периода 18.02–02.03.2014 г. на основе анализа данных КА VAP в работе [Liu et al., 2015] делается вывод о локальном ускорении релятивистских электронов на волнах типа

“хоров”, возбуждаемых электронами с $E \sim 10\text{--}100$ кэВ на фазе восстановления геомагнитных бурь. Также предполагается, что падение потока электронов на главной фазе бури может быть обусловлено адиабатическими потерями вследствие Dst -эффекта, также уходом за магнитопаузу и

Таблица 1. Времена пролетов половин орбит на рис. 5а–5е

Номер рисунка	Времена пролетов половин орбит	Направление движения	Примечание	
Рис. 5а	00:00–05:05 UT 15.02.2014	Внутрь	Тонкие линии	
	05:05–10:00 UT 15.02.2014	Наружу		
	10:00–15:00 UT 15.02.2014	Внутрь		
	15:00–19:30 UT 15.02.2014	Наружу		
	19:30 UT 15.02.2014–00:10 UT 16.02.2014	Внутрь	Толстая 1	
	00:10–04:40 UT 16.02.2014	Наружу	Толстая 2	
	04:40–09:40 UT 16.02.2014	Внутрь	Тонкие линии	
	09:40–14:40 UT 16.02.2014	Наружу		
	04:40–19:40 UT 16.02.2014	Внутрь		
	19:40–22:30 UT 16.02.2014	Наружу		
Рис. 5б	10:30–15:05 UT 18.02.2014	Внутрь	Тонкие линии	
	15:05–19:30 UT 18.02.2014	Наружу		
	19:30 UT 18.02.2014–00:10 UT 19.02.2014	Внутрь		
		00:10–04:40 UT 19.02.2014	Наружу	Толстая 1
		04:40–09:40 UT 19.02.2014	Внутрь	Толстая 2
	09:40–14:00 UT 19.02.2014	Наружу	Тонкие линии	
	14:00–19:30 UT 19.02.2014	Внутрь		
Рис. 5в	00:00–05:00 UT 20.02.2014	Наружу	Толстая 1	
	05:00–10:30 UT 20.02.2014	Внутрь	Толстая 2	
	10:30–15:00 UT 20.02.2014	Наружу	Толстая 3	
	15:00–19:30 UT 20.02.2014	Внутрь	Тонкие линии	
	19:30 UT 20.02.2014–00:10 UT 21.02.2014	Наружу		
	00:10–04:40 UT 21.02.2014	Внутрь		
	04:40–09:40 UT 21.02.2014	Наружу		
	09:40–14:00 UT 21.02.2014	Внутрь		
	14:00–19:30 UT 21.02.2014	Наружу	Тонкие 4–5	
	19:30–23:50 UT 21.02.2014	Внутрь		

рассеянием на волнах типа “шипений” [Liu et al., 2015]. *Dst*-эффект, переход электронов из области слабого в область более сильного магнитного поля, впервые был предложен в работе [McIlwain, 1966].

Практически во всех работах, посвященных динамике релятивистских электронов внешнего радиационного пояса, предполагается, что падение интенсивности потоков электронов обусловлено потерями электронов (назовем эти электроны “старыми”) вследствие того или иного механизма, а рост – ускорением других низко-энергичных электронов (назовем эти электроны “новыми”). Наше предположение состоит в том, что падение и затем рост интенсивности потока частиц во внешнем электронном радиационном поясе преимущественно обусловлены движением “старых” электронов наружу и внутрь радиационного пояса. Движение осуществляется под действием вариаций магнитного и электрического полей магнитосферы Земли. Потери “старых” частиц и

ускорение “новых” происходят, но не являются доминирующими на фоне основного процесса – переноса “старых” электронов. На примере событий 15–22.02.2014 г. постараемся показать, что глобальная динамика магнитного поля и вариации электрического поля солнечного ветра, контролирующего крупномасштабную конвекцию в магнитосфере, могут объяснить эволюцию потоков релятивистских электронов внешнего радиационного пояса магнитосферы Земли.

Магнитное поле управляет движением заряженных частиц в магнитосфере. В свою очередь потоки частиц создают токи, которые вносят свой вклад в динамику магнитосферного поля. Модели магнитосферы дают возможность исследовать вклады магнитных полей, создаваемых крупномасштабными токовыми системами под воздействием внешних условий (например, [Alexeev et al., 1996, 2001; Tsyganenko and Sitnov, 2007]). Параболоидная модель A2000 представляет околоземное магнитное поле в виде суммы полей крупномас-

штабных токовых систем [Alexeev et al., 1996, 2001]. В основе A2000 лежит аналитическое решение уравнения Лапласа для каждой системы с граничным условием $B_n = 0$ на магнитопаузе, которая аппроксимируется параболоидом вращения. Внешними параметрами модели являются данные измерений плазмы солнечного ветра и ММП и геомагнитные индексы. Динамика магнитосферы представлена как последовательность мгновенных состояний. Модель A2000 позволяет рассчитать магнитное поле от токов на магнитопаузе, от токов хвоста и кольцевого тока, а также Dst -вариацию (Dst_{mod}) и вклады в Dst -вариацию от вышеперечисленных токовых систем (Dcf , Dt , Dr , соответственно). Рассчитанные для поверхности Земли значения увеличиваются на 30% для учета вклада внутриземных токов [Hakkinen et al., 2002]. Вклад продольных токов в усредненное по долготе магнитное поле на поверхности Земли считается пренебрежимо малым [Alexeev et al., 2001].

По модели A2000 произведен расчет магнитного поля крупномасштабных токовых систем на поверхности Земли и Dst -вариации для периода 15–22.02.2014 (рис. 6), а также структуры силовых линий магнитосферы (рис. 7а–7е) для нескольких моментов в течение периода 15–16.02.2014 г., указанных на профиле Dst -вариации (рис. 7). Временные профили Dst -вариации и Dst_{mod} (рис. 6) достаточно хорошо согласуются друг с другом, что дает возможность проведения анализа состояния магнитосферы на основе модельных расчетов токовых систем. Как можно видеть, положительная вариация геомагнитного поля (Dst -вариация) 15–16.02.2014 г. связана, преимущественно, с токами на магнитопаузе вследствие воздействия импульса давления солнечного ветра, который также явился основной причиной сильного поджатия магнитосферы, что хорошо видно при сравнении рис. 7а и 7б – структуры магнитосферы в 04 UT и 20 UT 15 февраля. Фаза роста импульса давления солнечного ветра продолжалась длительное время, около 10 ч, что превышает характерные длительности дрейфовых периодов протонов кольцевого тока. Таким образом, можно ожидать, что с ~12 до ~22 UT 15 февраля происходило адиабатическое сжатие магнитосферы на фоне стабильных радиационных поясов. Условия роста кольцевого тока под действием импульса давления солнечного ветра рассмотрены в [Калегаев и др., 2015]. На фазе спада давления солнечного ветра, который носил характер нескольких резких импульсов, наблюдалась кратковременная переориентация ММП на южное направление, в результате произошла суббуря амплитудой около 1000 нТл, увеличилось ток хвоста и кольцевой ток (рис. 6), что привело к уменьшению Dst -вариации до спокойного уровня. Уменьшение магнитного поля происходило в течение трех часов (рис. 4), что сопоставимо, либо меньше характерных

дрейфовых периодов протонов кольцевого тока до 50 кэВ. В результате быстрого, неадиабатического, сдвига магнитопаузы во внутренней магнитосфере сохранился сформировавшийся при повороте ММП к югу буревой кольцевой ток на $R > 3.5R_E$. В свою очередь, усиление токов хвоста привело к вытягиванию силовых линий поля в хвост магнитосферы (рис. 7в) как во время умеренной классической магнитной бури (перепад величины Dst -вариации составил ~58 нТл).

Сформировавшаяся структура магнитного поля магнитосферы стала причиной наблюдаемой динамики внешнего радиационного пояса. Можно предположить, что причиной падения интенсивности потоков электронов на ГСО стал Dst -эффект – расширение L -оболочек, связанный с сохранением третьего инварианта для потоков захваченных электронов. При этом для сохранения первого инварианта энергия электронов должна уменьшиться. Умеренные магнитные бури затрагивают преимущественно внешние области магнитосферы, в частности ГСО, при этом подвергается изменениям структура силовых линий магнитного поля, следовательно, и потоки электронов.

В сердцевине радиационных поясов могли действовать другие механизмы. Как можно видеть по данным КА VAP (рис. 5а), увеличение кольцевого тока (профиль 2 на нижней панели рис. 5а) и уменьшение потока электронов произошло во время (табл. 1, после профиля 1), когда по данным ИСЗ GOES-15 наблюдалось два пересечения ГСО магнитопаузой: примерно в 22 UT 15 февраля и в ~00:30 UT 16 февраля (рис. 4), при этом ММП имело южную ориентацию. Динамику силовых линий магнитного поля на дневной стороне магнитосферы наглядно иллюстрируют рис. 7а–7е: дневной размер магнитосферы уменьшился практически в 2 раза. Максимум пояса электронов сдвинулся с ~4.7 R на ~3.7 R , интенсивность упала примерно в 2 раза (рис. 5а, два семейства профилей). Увеличилась крутизна внутренней границы внешнего радиационного пояса.

Можно предположить, что сдвиг – следствие именно импульса давления солнечного ветра. Волнообразный характер пространственно-временного профиля потоков электронов во время пролета КА VAP в ~19–24 UT 15 февраля (профиль 1 на рис. 5а) также свидетельствует в пользу сжатия магнитосферы, как основного фактора. Передний фронт импульса давления длился более 4 ч. После максимума в ~21 нПа произошел быстрый, в течение ~5 мин, спад до ~15 нПа, еще через ~15 мин давление составляло ~8 нПа. Механизм заброса электронов импульсом давления предложен в работе [Павлов и др., 1993], в которой рассматривался эффект формирования нового пояса электронов в результате воздействия на магнито-

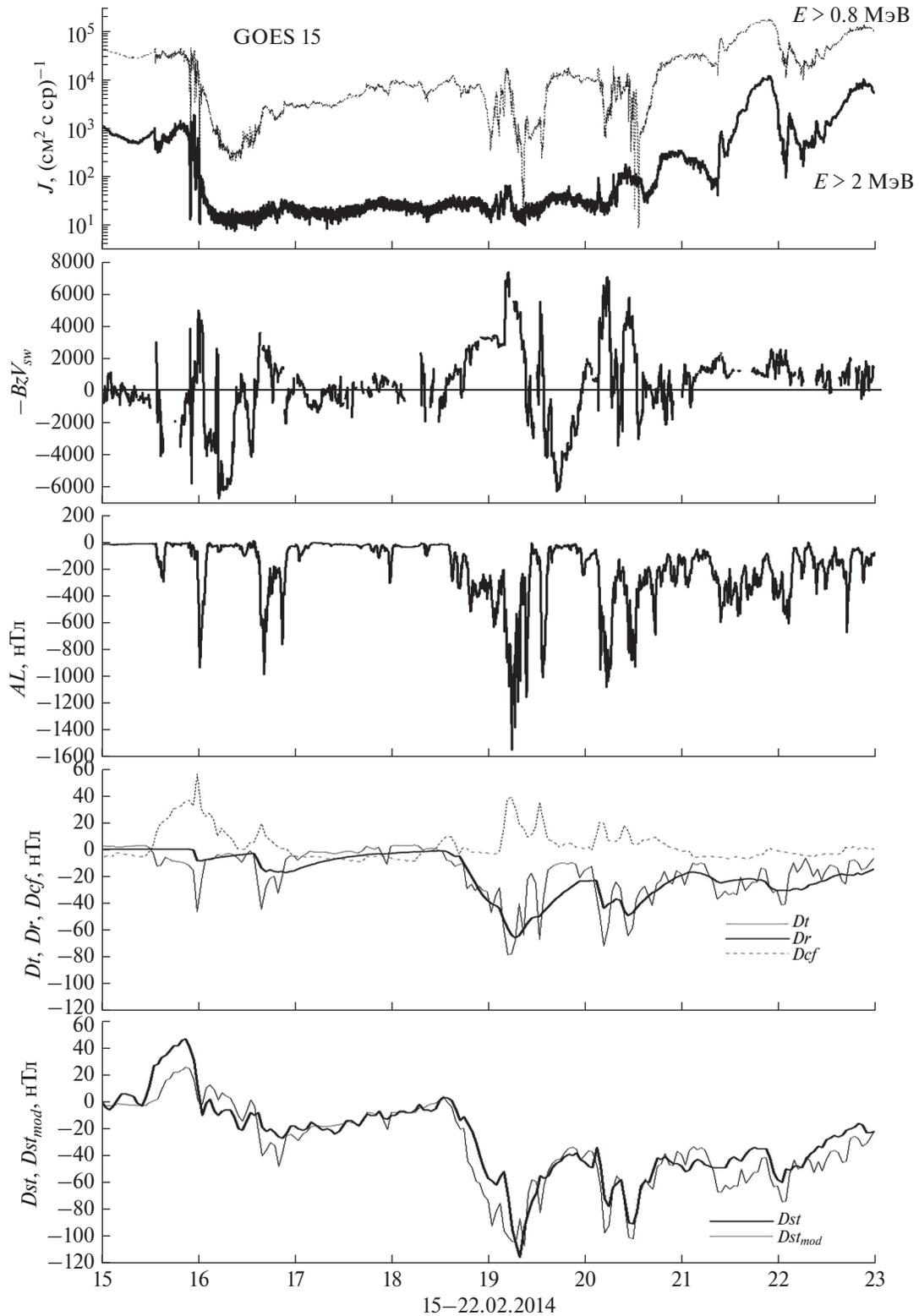


Рис. 6. Временные профили потоков электронов на ГЕО; функции $(-B_z V_{sw})$; AL -индекса; магнитного поля токов $-D_r$, D_t , D_{cf} ; Dst -вариации и рассчитанной Dst_{mod} .

сферу двух внезапных импульсов давления солнечного ветра, положительного и отрицательного. В случае 15–16.02.2014 г. под действием давле-

ния солнечного ветра магнитосфера медленно сжималась, а затем относительно быстро расширилась, и часть потока частиц могла остаться на

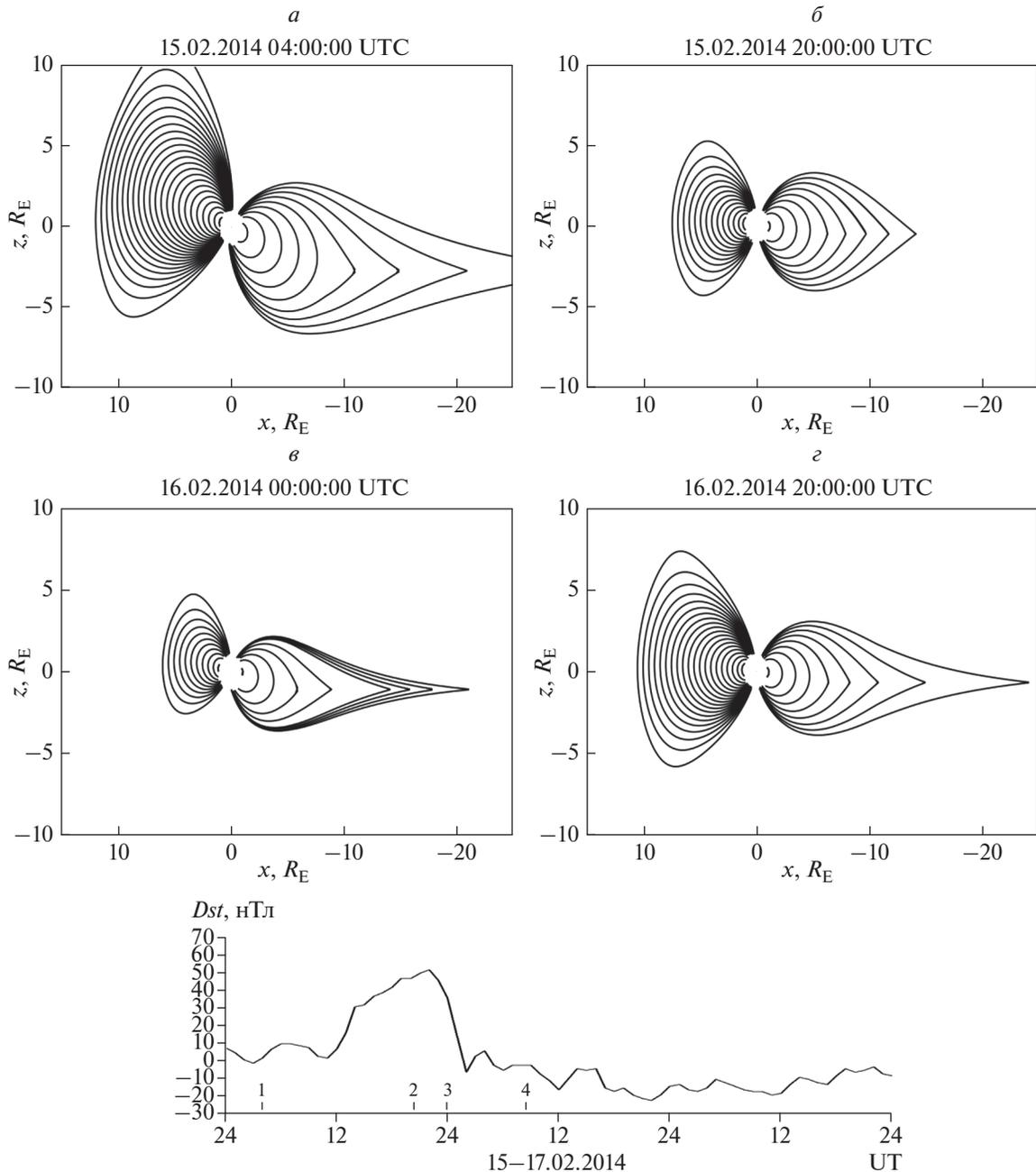


Рис. 7. Динамика структуры силовых линий геомагнитного поля, рассчитанных по модели A2000 и *Dst*-вариация 15–17.02.2014 г. Цифрами 1, 2, 3, 4 обозначены моменты времени, для которых рассчитаны силовые линии на рисунках *a*, *b*, *v*, *z* соответственно.

новых дрейфовых оболочках. Период дрейфа релятивистских электронов с $E \sim 2$ МэВ вокруг Земли на $L \sim 3$ составляет ~ 15 мин [Павлов и др., 1993]. На спаде импульса давления солнечного ветра произошла переориентация ММП, что могло усилить воздействие давления солнечного ветра на магнитопаузу, поскольку расстояние до подсолнечной точки также зависит от B_z -компоненты ММП [Shue et al., 1998]. Пространственно-временные профили потоков электронов (рис. 5а–

5в) свидетельствуют о сохранении потоков электронов на низких L -оболочках вследствие формирования бурового кольцевого тока 16 февраля: при этом структура профиля потоков электронов сохранилась практически до 20 февраля.

На динамику заряженных частиц в магнитосфере существенное влияние оказывает величина $(-B_z V_{sw})$ – электрическое поле солнечного ветра, определяющая крупномасштабную конвекцию в хвосте магнитосферы. С возрастанием положи-

тельных значений ($-B_z V_{sw}$) возрастает скорость дрейфа частиц в скрещенных полях (электрическом и магнитном) по направлению к Земле на ночной стороне магнитосферы. Именно данная функция связи, а не отдельные параметры $-B_z$ и V_{sw} , является важным геоэффективным параметром, ответственным за развитие кольцевого тока и за динамику радиационных поясов [Newell et al., 2007]. В работе [Georgiou et al., 2016] отмечено, что она контролирует радиальную диффузию частиц радиационных поясов Земли под воздействием УНЧ волн. Этот механизм мог бы способствовать движению электронов вглубь радиационных поясов в течение продолжительного периода устойчивой ориентации электрического поля “утро–вечер” в ночной магнитосфере.

Небольшие суббури во время $B_z < 0$ 15–16.02.2014 г. (см. AL -индекс на рис. 6) не привели к существенному росту потоков электронов с $E > 2$ МэВ на ГСО. Поток электронов с $E > 0.8$ МэВ немного увеличился. Как можно видеть (рис. 6), до ~ 13 UT 18 февраля функция ($-B_z V_{sw}$) преимущественно отрицательна, величина Dst -индекса меняется слабо. Силовые линии магнитного поля (рис. 7в, 7г) остаются вытянутыми в хвост магнитосферы. Можно предположить, что именно эти факторы препятствуют увеличению потока электронов и на ГСО (рис. 6), и в сердцевине радиационных поясов (рис. 3).

Сильная геомагнитная буря 19 февраля не оказала существенного влияния на поток электронов на ГСО (рис. 6). Внутри радиационных поясов наблюдались незначительные вариации (рис. 3 и 5б). Можно предположить, что дрейф частиц внутрь на главной фазе под действием сильного электрического тока (рис. 6) уравновешивался движением наружу из-за Dst -эффекта. На главной фазе бури внутренняя граница радиационного пояса различается на утренней и вечерней сторонах одной орбиты КА VAP (профили 1 и 2 на рис. 5б), что может быть интерпретировано, как асимметрия магнитосферы, причем только на фазе развития кольцевого тока (рис. 6). На главной фазе бури примерно в 04 UT 19.02 во время пролета КА наружу между $R \sim 5.4$ и $R \sim 5.7$ ($\Delta R \sim 0.4$) наблюдается постоянная величина интенсивности потока электронов (профиль 1 на рис. 5б). Можно предположить, что в этот период КА VAP движется вдоль одной и той же магнитной L -оболочки или изменилась структура геомагнитного поля на фазе развития кольцевого тока.

20 февраля к Земле подошел высокоскоростной поток солнечного ветра (рис. 2), который привел к умеренной геомагнитной буре ($Dst_{max} = 86$ нТл). 19 февраля северная ориентация ММП сменяется на южную. Начинается возрастание потока электронов на ГСО (рис. 6) и в сердцевине радиационных поясов (рис. 5в). Причем на ГСО

рост потока 20 февраля небольшой по сравнению с изменениями 21 февраля. Динамика пространственно-временных профилей потоков электронов в сердцевине радиационных поясов свидетельствует о первоначальном движении частиц наружу (профиль 2 по сравнению с профилем 1 на рис. 5в) и о последующей инжекции электронов из внешних областей магнитосферы (профиль 3 по сравнению с профилем 2 на рис. 5в). Сформировался максимум потока электронов на $R \sim 4.2$, что полностью соответствует описанной выше зависимости положения L_{max} от величины Dst для бури данной мощности [Тверская, 1986].

Наибольшее возрастание потоков электронов на ГСО наблюдается 21 февраля (рис. 6). При этом по данным КА VAP (рис. 5в) только на $R > 4.5$ поток возрастает, чем дальше от Земли, тем больше. Согласно нашей концепции, это связано со сравнительно небольшой по величине, но длительно положительной величиной функции связи ($-B_z V_{sw}$). В результате происходит накопление электронов на внешних L -оболочках радиационных поясов магнитосферы Земли.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено исследование динамики потоков релятивистских электронов внешнего радиационного пояса Земли и частиц кольцевого тока, основных токовых систем магнитосферы (кольцевого тока, токов хвоста магнитосферы и токов на магнитопаузе) и вариаций геомагнитного поля 15–22.02.2014 г. Используются экспериментальные данные по потокам частиц, полученные в сердцевине радиационных поясов на ИСЗ Van Allen Probes и на геостационарной орбите на ИСЗ GOES-15. По параболической модели магнитосферы A2000 [Alexeev et al., 1996, 2001] выполнены расчеты вкладов основных токовых систем в Dst -вариацию. В качестве внешних факторов, воздействующих на магнитосферу Земли, рассматривались скорость и давление солнечного ветра и B_z -компонента межпланетного магнитного поля.

Результаты сравнительного анализа динамики исследуемых параметров свидетельствуют о возможности объяснения эволюции потоков релятивистских электронов внешнего радиационного пояса перемещением “старых” частиц наружу и внутрь радиационного пояса под действием механизмов, связанных с вариациями магнитных и электрических полей в магнитосфере Земли. Основными механизмами являются: Dst -эффект – движение электронов из области слабого в область сильного магнитного поля; изменение структуры силовых линий геомагнитного поля – вытягивание силовых линий в хвост магнитосферы и дрейф в скрещенных геомагнитном и элект-

трическом полях. При этом ключевым внешним фактором является функция связи ($-B_z V_{sw}$) между параметрами межпланетной среды и геомагнитной активностью, которая влияет на величину электрического поля в хвосте магнитосферы. Необходимое условие для роста интенсивности потоков внешнего электронного радиационного пояса Земли — достаточно длительная южная ориентация межпланетного магнитного поля, при которой ($-B_z V_{sw}$) имеет положительную величину, а дрейф частиц на ночной стороне направлен внутрь магнитосферы.

Вследствие того, что механизмы, вызывающие движение электронов, действуют одновременно и на главной фазе геомагнитной бури, и на фазе восстановления, и их суммарный вклад в динамику потоков электронов зависит и от энергии электронов, результат трудно предсказуем, но предполагается, что это — основные механизмы. Процессы потерь (уход через магнитопаузу; высыпания вследствие пич-угловой диффузии на волнах) и ускорения “новых” частиц (менее энергичных электронов из seed-популяции), несомненно, делают свой вклад в поток “старых” электронов, но они менее значимы. Важным фактором, влияющим на динамику потоков внешнего электронного пояса, является сильный импульс давления солнечного ветра, в результате воздействия которого происходит смещение внутренней границы и максимума потоков электронов внешнего электронного пояса вглубь магнитосферы Земли, как это наблюдалось 15–16.02.2014 г.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Данные по солнечному ветру и геомагнитным индексам получены в Goddard Space Flight Center NASA (Omniweb) и в World Data Center C2 for Geomagnetism, Kyoto. Экспериментальные данные измерений ИСЗ Van Allen Probes получены в NASA/GSFC Space Physics Data Facility (SPDF), CDAWeb (the Coordinated Data Analysis Web) (<https://cdaweb.sci.gsfc.nasa.gov>).

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа поддержана грантами Российского фонда фундаментальных исследований № 19-05-00960 и Международного института космических исследований (ISSI/ISSI-VJ-439).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

— Калегаев В.В., Власова Н.А., Пенг Ж. Динамика магнитосферы во время магнитных бурь 21–22.I.2005 и 14–15.XII.2006 г. // Космич. исслед. Т. 53. № 2. С. 105–117. 2015.
— 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. 864–869. 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., Feldstein Y.I., Grafe A. Magnetic storms and magnetotail currents // J. Geophys. Res. V. 101. № A4. P. 7737–7747. 1996. <https://doi.org/10.1029/95JA03509>

— Alexeev I.I., Kalegaev V.V., Belenkaya E.S., Bobrovnikov S.Y., Feldstein Ya.I., Gromova L.I. Dynamic model of the magnetosphere: Case study for January 9–12, 1997 // J. Geophys. Res. V. 106. № A11. P. 25683–25694. 2001. <https://doi.org/10.1029/2001JA900057>

— Antonova E.E., Vorobjev V.G., Riazantseva M.O. et al. Auroral oval and outer electron radiation belt // “Physics of Auroral Phenomena” Pros. XL Annual Seminar. Apatity. P. 6–10. 2017.

— 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>

— Georgiou M., Daglis I.A., Rae I.J., Zesta E., Sibeck D.G., Mann I. R., Balasis G., Tsinganos K. Ultra-low frequency waves as an intermediary for solar wind energy input into the radiation belts // J. Geophys. Res. Space Physics. V. 123. P. 10.090–10.108. 2018. <https://doi.org/10.1029/2018JA025355>

— Hakkinen L., Pulkkinen T.I., Nevanlinna H., Pirjola R.J., Tanskanen E.I. Effect of induced currents on Dst and on magnetic variations at midlatitude stations // J. Geophys. Res. V. 107. 2002. <https://doi.org/10.1029/2001JA900130>

— Lazutin L.L., Dmitriev A.V., Suvorova A.V. Electron radiation belt dynamics during magnetic storms and in quiet time // Solar-Terr. Physics. V. 4. № 1. P. 51–60. 2018. <https://doi.org/10.12737/stp-41201805>

— Li X., Selesnick R.S., Baker D.N., Jaynes A.N., Kanekal S.G., Schiller Q., Blum L., Fennell J., Blake J.B. Upper limit on the inner radiation belt MeV electron intensity // J. Geophys. Res. V. 120. № 2. P. 1215–1228. 2015. <https://doi.org/10.1002/2014JA020777>

— Liu S., Xiao F., Yang C. et al. Van Allen Probes observations linking radiation belt electrons to chorus waves during 2014 multiple storms // J. Geophys. Res. Space Physics.

V. 120. P. 938–948. 2015.

<https://doi.org/10.1002/2014JA020781>

– *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>

– *McIlwain C.E.* Ring current effects on trapped particles // *J. Geophys. Res.* V. 71. P. 3623–3628. 1966.

– *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., Morley S.K., Friedel R.H.W., Funsten H.O., Baker D.N., Kan S.G.* 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>

– *Shue J.-H., Chao J.K., Fu H.C., Khurana K.K., Russell C.T., Singer H.J., Song P.* Magnetopause location under extreme solar wind conditions // *J. Geophys. Res.* V. 103. P. 17691–17700. 1998.

– *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>

– *Tsyganenko N.A., Sitnov M.I.* Magnetospheric configurations from a high-resolution data-based magnetic field model // *J. Geophys. Res.* V. 112. P. A06225. 2007.

<https://doi.org/10.1029/2007JA012260>