

ВАРИАЦИИ ПОТОКОВ БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В ИОНОСФЕРЕ В ПЕРИОДЫ СОЛНЕЧНЫХ ЦИКЛОВ

© 2019 г. Г. В. Голубков^{1,2*}, А. В. Дмитриев^{3,4}, А. В. Суворова^{3,4}, М. Г. Голубков¹

¹Институт химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук, Москва, Россия

²Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия

³Национальный центральный университет, Чонгли, Тайвань

⁴Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*E-mail: golubkov@chph.ras.ru

Поступила в редакцию 03.04.2019;

после доработки 03.04.2019;

принята в печать 22.04.2019

Быстрые электроны (с энергией от 10 до 1000 кэВ) из радиационного пояса Земли (РПЗ) играют важную роль в процессах, связанных с ионизацией верхней атмосферы и ионосферы от экватора до высоких широт. Рассмотрены основные источники и свойства быстрых электронов на высотах ионосферы до 1000 км. На высоких широтах (больше 50°) источниками таких электронов являются высыпания из внешнего пояса. На низких широтах интенсивные потоки электронов появляются в результате их инжекции из внутреннего РПЗ. Проведен анализ солнечно-циклической вариации потоков быстрых электронов в течение двух солнечных циклов в период с 1998 по 2018 гг. Показано, что максимальные потоки электронов наблюдаются чаще всего на фазах спада солнечной активности (СА), что связано с вкладом рекуррентной геомагнитной активности. Самые низкие потоки обнаружены в глубоком минимуме СА 2009 года. В результате потоки быстрых электронов во время текущего 24-го солнечного цикла оказались слабее, чем в предыдущем 23-м цикле. Кроме того, над Сибирью наблюдается аномальное смещение положения максимума внешнего радиационного пояса Земли к экватору на 4° (что эквивалентно расстоянию в 400 км), которое не предсказывается стандартной моделью. По всей видимости, это связано с ускорением изменения геомагнитного поля в этом регионе.

Ключевые слова: потоки быстрых электронов, ионосфера, радиационный пояс Земли, солнечные циклы.

DOI: 10.1134/S0207401X19100042

1. ВВЕДЕНИЕ

Интенсивные потоки энергетических частиц, электронов и протонов с энергиями в десятки и сотни кэВ, проникающих из магнитосферы на низкие высоты, постоянно оказывают воздействие на верхнюю атмосферу. Благодаря ионизации и возбуждению нейтральных атомов и молекул атмосферного газа изменяются локальные характеристики ионосферы и мезосферы. Двигаясь вдоль силовых линий геомагнитного поля, быстрые электроны теряют энергию главным образом на ионизацию нейтральных газов в верхней атмосфере: молекул кислорода, азота, оксида азота и др. Потенциалы ионизации этих газов составляют порядка 10–15 эВ. По модели стандартной атмосферы было рассчитано, насколько глубоко в атмосферу способен проникнуть электрон с данной энергией [1]. В табл. 1 приводятся резуль-

таты расчета минимальных высот h_{min} , на которые способны проникнуть быстрые электроны. Например, электроны с энергией 10 кэВ полностью теряют свою энергию уже на высоте 100 км, а электроны с энергией 500 кэВ способны проникнуть до высот порядка 60 км. Важно отметить, что основные потери энергии происходят вблизи h_{min} , поскольку сечение ионизации быстро растет с уменьшением энергии [2]. Таким образом, быстрые электроны являются главным источником ионизации верхней атмосферы, а также D- и E-слоев ионосферы.

На дневной стороне быстрые электроны являются ключевым фактором формирования ридберговских комплексов на высотах 60–100 км [3], поскольку один электрон с энергией 30 кэВ в процессе ионизации способен выбить порядка 10^3 тепловых электронов. Потоки электронов с энергиями, большими 30 кэВ, на низких широтах могут до-

Таблица 1. Основные расчетные параметры быстрых электронов РПЗ

| Энергия, кэВ | h_{min} , км | R_c , м* | T_{d1} , ч** | T_{d2} , ч*** |
|--------------|----------------|------------|----------------|-----------------|
| 10 | 100 | 20 | 60 | 17.6 |
| 30 | 86 | 35 | 19.3 | 5.6 |
| 100 | 75 | 70 | 5.1 | 1.5 |
| 300 | 66 | 160 | 1.3 | 0.36 |
| 500 | 62 | 260 | 0.6 | 0.18 |

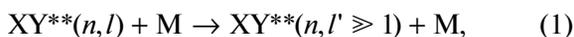
* Гирорадиус в максимуме внутреннего РПЗ ($L = 1.3R_E$).

** Период азимутального дрейфа в максимуме внутреннего РПЗ ($L = 1.3R_E$).

*** Период азимутального дрейфа в максимуме внешнего РПЗ ($L = 4R_E$).

стигать 10^7 ($\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср}$)⁻¹ [4]. Такие потоки в области высот от 86 до 100 км способны производить по крайней мере 10^5 тепловых электронов в 1 см^3 за 1 с. Более точные данные могут быть получены с учетом спектра быстрых электронов, проникающих в атмосферу.

Ридберговскими называются такие высоковозбужденные состояния молекул, которые расположены вблизи границы ионизации и характеризуются наличием бесконечной последовательности уровней энергии, сходящихся к порогу ионизации. Ридберговские молекулы обладают одним возбужденным слабосвязанным электроном, состояние которого задается главным квантовым числом n и угловым моментом l относительно ионного остова. Энергии уровней с большими угловыми моментами не зависят от l , т.е. являются орбитально вырожденными. Процесс, приводящий к образованию орбитально вырожденных состояний:



называется l -перемешиванием [5–7]. В нейтральной среде верхней атмосферы, плотность которой на высоте от 60 до 110 км от поверхности Земли изменяется в интервале $10^{12} < \rho_a < 10^{16} \text{ см}^{-3}$, реакция (1) протекает быстро и является необратимой, т.е. наибольшее число ридберговских частиц в плазме оказывается в орбитально вырожденных состояниях. Взаимодействие с молекулами среды приводит к расщеплению уровней энергии этих состояний [8] и образованию ридберговских комплексов $\text{ХУ}^{**}-\text{М}$, где символ М – молекула азота или кислорода.

Как было показано в работах [9, 10], оптические переходы между отщепленными и вырожденными состояниями ридберговских комплексов $\text{ХУ}^{**}-\text{М}$, происходящие без изменения главного квантового числа n : $\Delta n = 0$, приводят к сверхфононому

СВЧ-излучению в дециметровом диапазоне. Переходы с изменением главного квантового числа на единицу ($\Delta n = 1$) являются причиной сверхфонового ИК-излучения D - и E -слоев ионосферы. Кроме того, ридберговские комплексы являются причиной сбоев работы глобальных навигационных спутниковых систем, так как они приводят к задержкам при распространении электромагнитного излучения за счет каскада резонансного перерассеяния на высоковозбужденных частицах среды [11].

На средних и высоких широтах потоки быстрых электронов и их ионизационный эффект на несколько порядков выше. Важно отметить, что быстрые электроны на низких высотах ионизируют атмосферу локально в области от 10 до 500 м, поскольку имеют достаточно маленький гирорадиус вращения вокруг силовых линий магнитного поля (см. табл. 1).

С начала 1960-х годов было известно, что источником быстрых электронов на высотах ионосферы до 1000 км является радиационный пояс Земли (РПЗ), расположенный на расстояниях от $1.2R_E$ до $10R_E$ (см. рис. 1), где R_E – радиус Земли. Радиационный пояс Земли имеет два максимума распределения быстрых электронов: внутренний максимум на расстоянии $\sim 1.3R_E$ и внешний – на расстоянии $\sim 4R_E$, разделенные областью с низкими потоками электронов (так называемым зазором РПЗ), находящихся на расстояниях $(2 \div 3)R_E$. В связи с этим разделяют внешний и внутренний РПЗ. На рис. 1 внешний РПЗ представляет собой две полосы, проходящие на средних и высоких (больше 50°) широтах, а внутренний пояс выглядит крупным пятном в области Бразильской магнитной аномалии (БМА), находящейся на низких широтах в секторе от 30° до 90° западной долготы.

Внешний РПЗ заполнен быстрыми и релятивистскими электронами (с энергией от десятков кэВ до нескольких МэВ), захваченными во внешней магнитосфере [12]. Во внешнем РПЗ они дрейфуют вокруг Земли на экваториальных расстояниях, превышающих $\sim 3R_E$. Периоды азимутального дрейфа T_d приведены в табл. 1. Видно, что электроны с энергией 10 кэВ имеют $T_d = 17.6$ ч, что сравнимо с периодом обращения Земли. Электроны меньших энергий практически не входят в популяцию тока РПЗ, а электроны с энергиями, большими 300 кэВ, обращаются вокруг Земли с периодами менее 1 ч.

Электроны также совершают колебательные движения вдоль линий геомагнитного поля, отражаясь от так называемых зеркальных точек, расположенных на относительно низких высотах (см. рис. 2). Определенная часть электронов

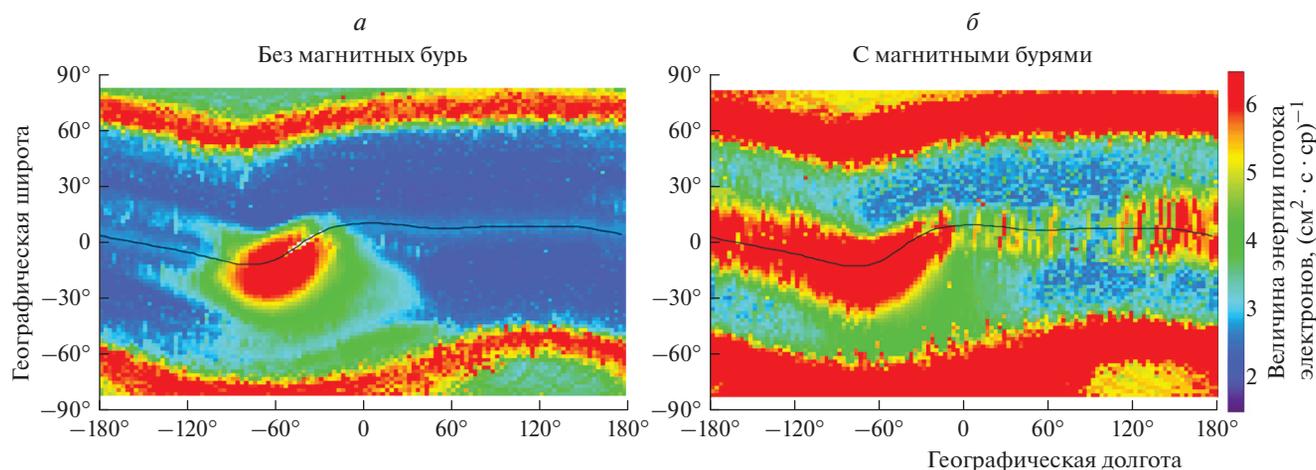


Рис. 1. Глобальные карты с распределением потоков электронов с энергией >30 кэВ электронов в географических координатах, полученные по данным измерений спутников NOAA/POES за период времени с 1998 по 2016 гг.: типичное распределение в отсутствие сильных магнитных возмущений, наблюдаемое в течение 75% времени (*а*) и во время магнитных бурь (*б*). Магнитный экватор показан черной кривой. Проекция внешнего РПЗ выглядит в виде полос на высоких широтах ($>50^\circ$) с интенсивными потоками электронов. Проекция внутреннего РПЗ выглядит крупным пятном в области БМА на низких широтах в секторе долгот от -100° до 0° . На панели *а* запрещенная зона с низкими потоками электронов расположена на низких широтах вне области БМА. На панели *б* запрещенная зона заполнена интенсивными потоками электронов, инжектированных из внутреннего РПЗ.

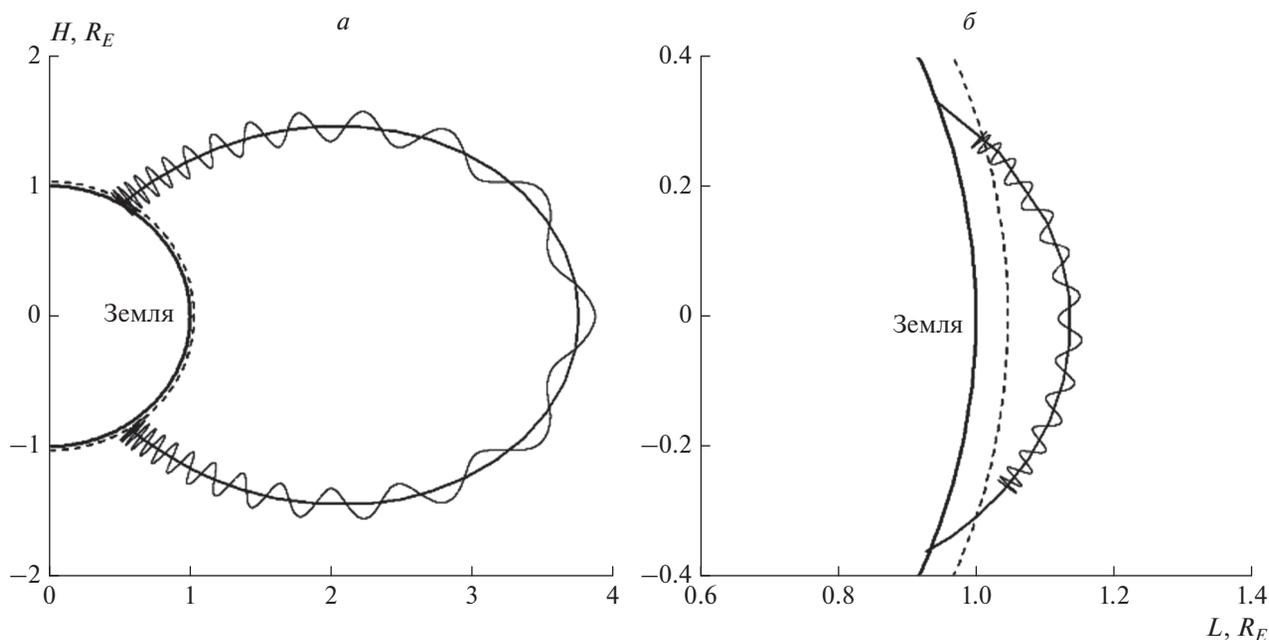


Рис. 2. Траектории движения электронов из внешнего (*а*) и внутреннего (*б*) РПЗ (спиральные кривые) вокруг силовой линии геомагнитного поля (сплошная кривая). Штриховой линией обозначена условная граница атмосферы на высоте 100 км. Частицы быстро проходят экваториальную область и проводят большую часть времени вблизи зеркальных точек на низких высотах. Для частиц внешнего РПЗ зеркальные точки находятся на широтах $\sim 60^\circ$, для внутреннего РПЗ – на широтах $\sim 15^\circ\text{--}20^\circ$.

внешнего РПЗ имеет зеркальные точки в ионосфере и атмосфере на средних и высоких широтах (см. рис. 2*а*). Такие электроны называют *высып-*

ющимися, поскольку они быстро тратят свою энергию на ионизацию в области зеркальной точки, где они проводят большую часть своего времени.

Хорошо известно, что высыпание быстрых электронов из внешнего РПЗ вызывает нагрев верхней атмосферы [13], что в свою очередь приводит к повышению содержания N_2 и NO в верхних слоях атмосферы и, следовательно, к изменению химического состава в термосфере [14]. Нагрев также генерирует нейтральные ветры, направленные к экватору, которые переносят изменения на более низкие широты [15]. В результате интенсивные высыпания электронов из внешнего РПЗ на высоких широтах могут повлиять на всю ионосферу от высоких до экваториальных широт.

Внешний РПЗ очень динамичен, и интенсивности потоков высыпающихся быстрых электронов могут варьироваться на несколько порядков на временных масштабах от часов до нескольких лет [16, 17]. На коротких временных масштабах поток быстрых электронов увеличивается на порядок непосредственно после начала магнитных бурь и достигает максимума на фазе восстановления бури [18]. Наиболее интенсивные высыпания наблюдаются в утренней и дневной областях освещенности. На длительных временных масштабах было обнаружено, что в минимуме солнечного цикла РПЗ наиболее удален от Земли и потоки электронов в нем минимальны [19].

Быстрые электроны из внутреннего РПЗ постоянно наблюдаются на низких широтах в локальной области, ограниченной долготным диапазоном 0° – 100° з.д., из-за наличия БМА. Нижняя граница внутреннего пояса находится на дрейфовых оболочках с $L \sim 1.2R_E$. Ниже этой границы под внутренним радиационным поясом за пределами БМА потоки электронов резко уменьшаются до фонового уровня из-за рассеяния в плотной атмосфере в зоне БМА, вследствие чего эту низкоширотную область принято называть *запрещенной зоной*. На рис. 1а запрещенная зона со слабыми потоками хорошо видна на экваториальных и средних широтах. Представление о таком типичном распределении электронов доминировало несколько десятилетий. Однако данное распределение наблюдалось в течение времени, соответствующем только 75% от полного времени, составившего 19 лет [20]. В настоящей работе рассмотрены длительные солнечно-циклические вариации потоков быстрых электронов в ионосфере за период с 1998 по 2018 годы, т.е. в течение 23-го и 24-го солнечных циклов.

2. УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Непрерывный мониторинг быстрых частиц на высоте ~ 850 км с помощью низкоорбитальных полярных спутников серии NOAA/POES [21] в период с 1998 по 2018 годы позволяет исследовать солнечно-циклическую вариацию потоков быст-

рых электронов в ионосфере. Одновременно летало до шести спутников в трех орбитальных плоскостях, включая сектор меридиана полдень–полночь. На спутниках POES были установлены детекторы для измерения высыпающихся и захваченных быстрых электронов и протонов в широком энергетическом диапазоне – от 30 кэВ до нескольких МэВ.

Энергии электронов измерялись в трех интегральных каналах: >30 , >100 и >300 кэВ. Важно отметить, что квазизахваченные электроны, время жизни которых не превышает 1 сут, быстро теряются в верхних слоях атмосферы во время азимутального дрейфа на восток, поскольку их дрейфовые оболочки опускаются на более низкие высоты с плотной атмосферой. Поэтому важным параметром здесь является концентрация квазизахваченных электронов.

Для анализа роста плотности электронов на низких широтах (до 30° географической широты) в *запрещенной* зоне была создана база данных, состоящая из ~ 7000 суточных глобальных карт с распределением потоков электронов во временном интервале с 1998 по 2016 гг. [20, 22]. Из них было выбрано 530 карт, отвечающих с сильным возрастанием потоков электронов с энергией, большей 30 кэВ (до 10^5 (см 2 · с · ср) $^{-1}$ и выше), в запрещенной зоне. Примеры карт приведены на рис. 3. Для определения солнечно-циклической вариации для каждого года отдельно бралось необходимое число суточных глобальных карт. По этим данным находилась также максимально возможный поток электронов за год.

На высоких широтах фоновые потоки электронов, высыпающихся из максимальной по энергии области внешнего РПЗ на дневной стороне (в двухчасовой окрестности локального полдня), регистрировались в течение геомагнитных спокойных дней во временном интервале с 2001 по 2018 годы. Спокойные дни выбирались в месяце июне, когда северная полярная ионосфера имела наибольшую освещенность.

Данные о быстрых электронах сравнивались с поведением солнечной активности. Известно, что солнечная активность (СА) характеризуется числом солнечных пятен, данные о которых были получены от WDC-SILSO (Королевская обсерватория Бельгии, Брюссель). Согласно этим данным интервал с 1998 по 2018 годы начинается от фазы роста 23-го солнечного цикла, заканчивается поздней фазой спада 24-го солнечного цикла и включает в себя два солнечных максимума и аномально низкий солнечный минимум 2009 года.

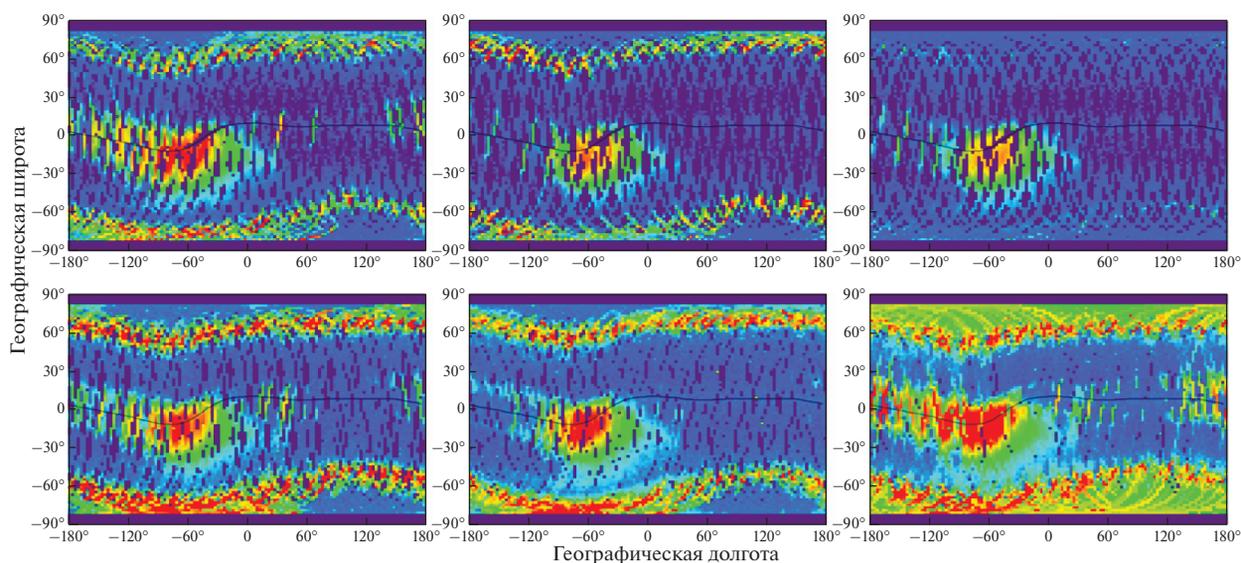


Рис. 3. Примеры суточных глобальных карт с сильными возрастаниями потоков электронов вблизи экватора для разных условий геомагнитной активности: верхний ряд — для 23-го цикла 28 июля 2006 ($|D_{st}| \sim 100$ нТл), 20 февраля 2006 ($|D_{st}| \sim 50$ нТл) и 24 июня 2006 ($|D_{st}| \sim 0$ нТл), нижний ряд — для 24-го цикла 8 мая 2016 ($|D_{st}| \sim 100$ нТл), 14 октября 2015 ($|D_{st}| \sim 50$ нТл) и 22–23 июня 2015 ($|D_{st}| \sim 200$ нТл).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В 2012 году были обнаружены нетипичные возрастания потоков электронов в запрещенной зоне, как показано на рис. 1б. Следует отметить, что в ранних экспериментах в ряде случаев были обнаружены спорадические возрастания потоков кэВ-электронов в запрещенной зоне [23–25]. Однако несовершенство экспериментальных методик и отсутствие постоянного мониторинга в то время не позволили убедительно доказать возможность существования больших потоков электронов продолжительное время в этой зоне. Возрастания потоков быстрых электронов в запрещенной зоне были надежно установлены [26] спустя 50 лет.

Энергия электронов в запрещенной зоне (“запрещенных” электронов) ограничена диапазоном 30–300 кэВ [4]. Как видно из табл. 1, период азимутального дрейфа таких электронов изменяется от 1 сут до 1 ч. Потоки “запрещенных” электронов могут возрастать на пять порядков величины [4, 15, 27, 28] и наблюдается это, как правило, в ранние утренние часы или сразу после полуночи. Затем через несколько часов в результате дрейфа в восточном направлении в сторону БМА интенсивные потоки появляются на дневной стороне. В среднем спорадические возрастания потока “запрещенных” электронов наблюдаются на протяжении времени, составляющем 25% от общего времени наблюдения [20]. В течение 530 дней из 19 лет, потоки увеличиваются на 4–5 порядков и наблюдаются от экватора до

$\sim 30^\circ$ с.ш. и $\sim 20^\circ$ ю.ш. Такие сильные возрастания представлены на рис. 1б. Как показано на рис. 2б, “запрещенные” электроны имеют точки отражения во внешней атмосфере на геомагнитных широтах от $\sim 15^\circ$, т.е. они способны ионизировать D- и E-слои ионосферы на низких широтах.

Возрастание концентрации электронов в запрещенной зоне есть результат их инъекций из внутреннего РПЗ [29]. Инъекция или быстрый перенос подразумевает нарушение адиабатичности движения заряженных частиц и изменение их дрейфовой L-оболочки. Механизм нарушения предположительно связан с радиальным дрейфом в скрещенных электрическом и магнитном полях [26]. Существование сильных электрических полей (вероятно, локального и транзиентного характера) экспериментально пока не обнаружено. Обычно в литературе к глубоким относят инъекции частиц внутри геосинхронной орбиты ($L \sim 6R_E$) [30]. Однако в нашем случае наблюдаемые инъекции в запрещенную зону на оболочки с $L < 1.2R_E$ являются гораздо более глубокими.

Статистические исследования показывают, что возрастание концентрации электронов в запрещенной области значительно чаще наблюдаются в период с мая по сентябрь (северное лето) [20]. Также небольшой максимум вероятности таких событий виден в декабре–январе. Глубокие минимумы вероятности наблюдаются в периоды осеннего и весеннего равноденствия, т.е. когда геомагнитная активность, наоборот, усиливается. Такая необычная статистика возрастаний может

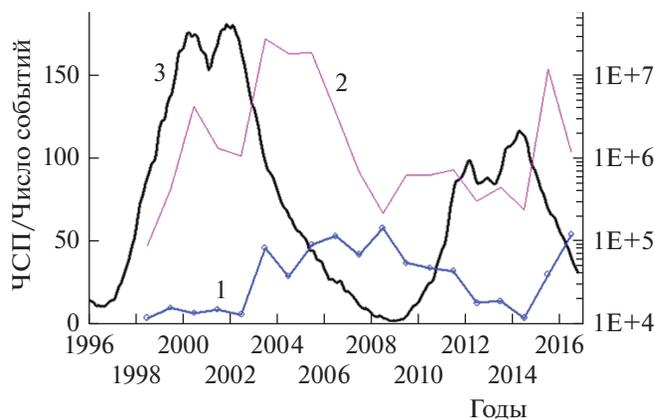


Рис. 4. Солнечно-циклические вариации вероятности сильных возрастаний потоков (кривая 1) и максимальной интенсивности потоков (кривая 2). Среднегодовое число солнечных пятен (ЧСП) (число Вольфа) показано кривой 3.

быть объяснена повышенной проводимостью авроральной ионосферы на дневной (освещенной) стороне, которая контролируется наклоном оси геодиполя, а два неравноценных максимума связаны с несимметричностью геодиполя относительно земной оси.

3.1. Быстрые электроны на экваторе и в низких широтах

Солнечно-циклическая вариация потоков электронов в запрещенной зоне может быть связана с вариацией геомагнитной активности. На рис. 3 показаны примеры суточных распределений потоков с сильными возрастаниями в запрещенной зоне, которые наблюдались в разных геомагнитных условиях и различных солнечных циклах. Установлено, что наиболее длительные возрастания наблюдаются во время сильных магнитных бурь с амплитудой D_{st} -вариации, превышающей 100 нТл (см. рис. 3, две левые панели). В приведенных примерах магнитные бури 28 июля 2006 года (23-й цикл) и 8 мая 2016 года (24-й цикл) имели приблизительно одинаковую амплитуду: $|D_{st}| \sim 100$ нТл. С другой стороны, выяснилось, что правило “чем мощнее буря, тем вероятнее наблюдать экваториальное возрастание электронов” не работает, т.е. сильная буря не обязательно приведет к инъекции электронов в запрещенную зону [4]. Более того, во время некоторых слабых бурь тоже можно наблюдать инъекции и иногда длительные.

Примеры возрастаний интенсивностей потоков электронов во время умеренных бурь с $|D_{st}| \sim 50$ нТл, имевших место 20 февраля 2006 года и 14 октября 2015 года, показаны на средних панелях рис. 3. В спокойной геомагнитной обстановке также могут наблюдаться возрастания, но более короткие по длительности. Одно из спокойных

событий ($D_{st} \sim 0$ нТл), наблюдавшееся 24 июня 2006 года, показано на правой верхней панели рис. 3. Известная супербуря, наблюдавшаяся 22–23 июня 2015 года ($|D_{st}| \sim 200$ нТл), также сопровождалась инъекциями из внутреннего пояса, которые продолжались несколько дней (см. рис. 3, правая нижняя панель). Приведенные примеры свидетельствуют о том, что не существует прямой зависимости между вероятностью возрастания потоков электронов в запрещенной зоне и уровнем геомагнитной активности, который оценивается по мощности магнитных бурь. Однако можно отметить тенденцию к более интенсивным потокам частиц и большему количеству инъекций во время сильных геомагнитных возмущений. Несколько последовательных инъекций приводят к длительным возрастаниям потоков в течение суток и более.

Рисунок 4 показывает солнечно-циклические вариации числа дней с заметными возрастаниями концентраций электронов с энергией, большей 30 кэВ, и их максимальных потоков в запрещенной зоне за временной период двух солнечных циклов. Несмотря на то, что 24-й цикл еще не завершен, уже можно видеть много общего в вариациях вероятности и максимальной интенсивности возрастаний для двух разных циклов. В частности, минимальная вероятность роста концентрации быстрых электронов наблюдается во время солнечных максимумов в 2000–2001 гг. и 2012–2014 гг. Число таких дней весьма ограничено и приблизительно одинаково в обоих максимумах. На фазах спада циклов (2002–2007 гг. и 2014–2016 гг.) число дней с сильными возрастаниями резко увеличивается. В 23-м цикле изменение числа возрастаний имеет широкий максимум, начиная с середины фазы спада в 2003 году и до глубокого солнечного минимума в 2009 году. К сожалению, статистика для миниму-

ма 24-го цикла в настоящее время отсутствует. На фазе возрастания и в максимуме 24-го цикла (2009–2013 гг.) вероятность возрастных медленностей уменьшается.

Величина максимальных потоков быстрых электронов (с энергией больше 30 кэВ) отражает как совпадения, так и различия между циклами. По-видимому, это связано с тем, что 24-й цикл проявил себя как очень слабый. Наименьшие максимальные потоки на уровне порога в 10^5 ($\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср})^{-1}$ наблюдаются во время максимумов и минимумов солнечной активности. Резкое увеличение максимальной интенсивности (до $>10^7$ ($\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср})^{-1}$) происходит на фазах спада солнечных циклов. В целом, 23-й цикл характеризуется более интенсивными и длительными возрастаниями потоков электронов, чем 24-й цикл.

3.2. Быстрые электроны на средних и высоких широтах

При анализе внешнего РПЗ были рассмотрены три долготных сектора: американский сектор на долготе около -80° , европейский сектор на долготе около 0° и сибирский сектор на долготе около 100° . Величины электронных потоков, измеренных 3 июня 2016 года в трех долготных секторах, представлены на рис. 5. Максимум внешнего РПЗ расположен в различных секторах на разных долготах, поскольку ось геоидиполя наклонена относительно оси вращения Земли. Наиболее интенсивные потоки (более $2 \cdot 10^5$ ($\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср})^{-1}$) наблюдаются на самых высоких широтах $\sim 67^\circ$ в сибирском секторе. Самые слабые потоки ($5 \cdot 10^4$ ($\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср})^{-1}$) обнаружены в европейском секторе на широте $\sim 65^\circ$. В американском секторе максимальные потоки электронов во внешнем РПЗ сопоставимы с сибирскими, но они расположены на самых низких широтах $\sim 54^\circ$.

Используя данные POES, можно проанализировать солнечно-циклические вариации фоновых потоков электронов и местоположение максимума внешнего РПЗ. На рис. 6 показаны вариации, полученные для быстрых электронов (с энергией, большей 30 и 100 кэВ). Видно, что максимальные потоки наблюдаются во время максимумов и в середине фаз спада СА. Наиболее низкие потоки обнаружены в глубоком минимуме СА 2009 года. В целом, электронные потоки во время текущего 24-го солнечного цикла слабее, чем в предыдущем, 23-м цикле. Уменьшение потоков хорошо видно по линейной аппроксимации, которая имеет явный отрицательный уклон (см. верхние панели на рис. 6). Это уменьшение можно объяснить тем, что 24-й солнечный цикл слабее, чем 23-й (см. нижние панели рис. 6).

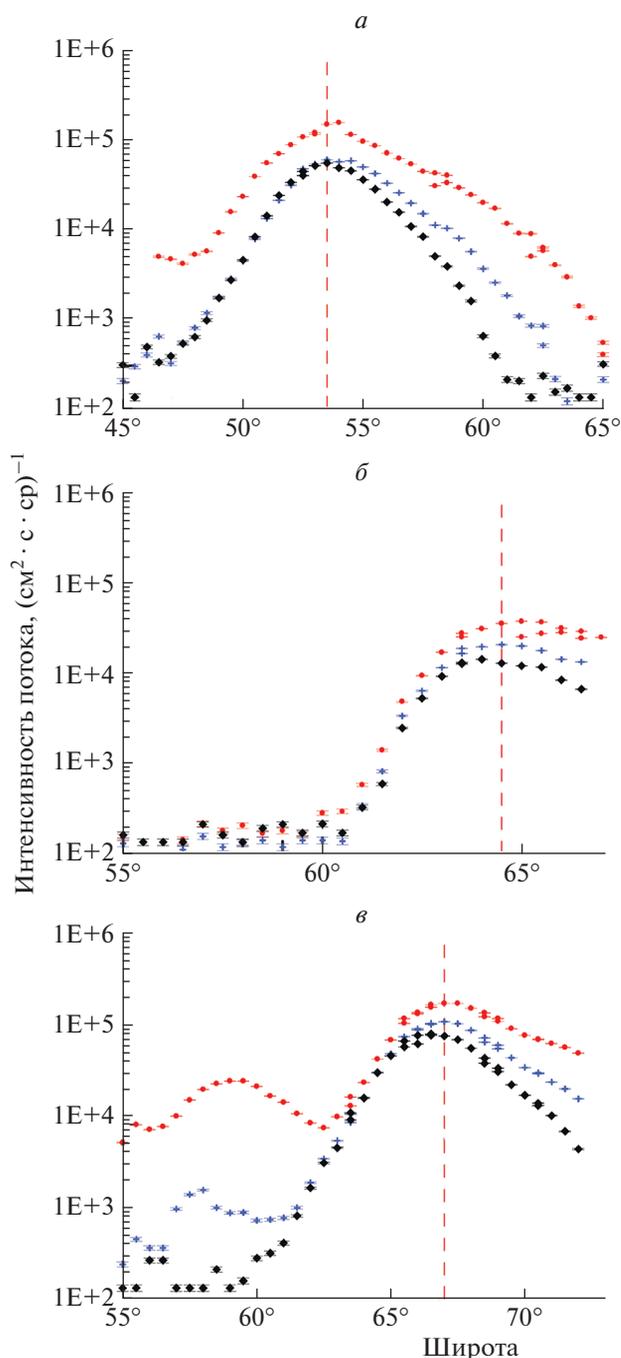


Рис. 5. Спектры быстрых электронов, измеренные 3 июня 2016 года около местного полудня во внешнем РПЗ в различных долготных секторах: *a* – американский сектор (долгота $\sim -80^\circ$), *b* – европейский сектор (долгота $\sim 0^\circ$), *v* – сибирский сектор (долгота $\sim 100^\circ$). Максимумы РПЗ отмечены вертикальными штриховыми линиями; интегральные каналы: ● – >30 кэВ, + – >100 кэВ, ◆ – >300 кэВ.

Положение максимума внешнего РПЗ имеет более сложную динамику. Проведено ее сравнение с предсказаниями изменения геомагнитного поля по международной модели IGRF 2012. В амери-

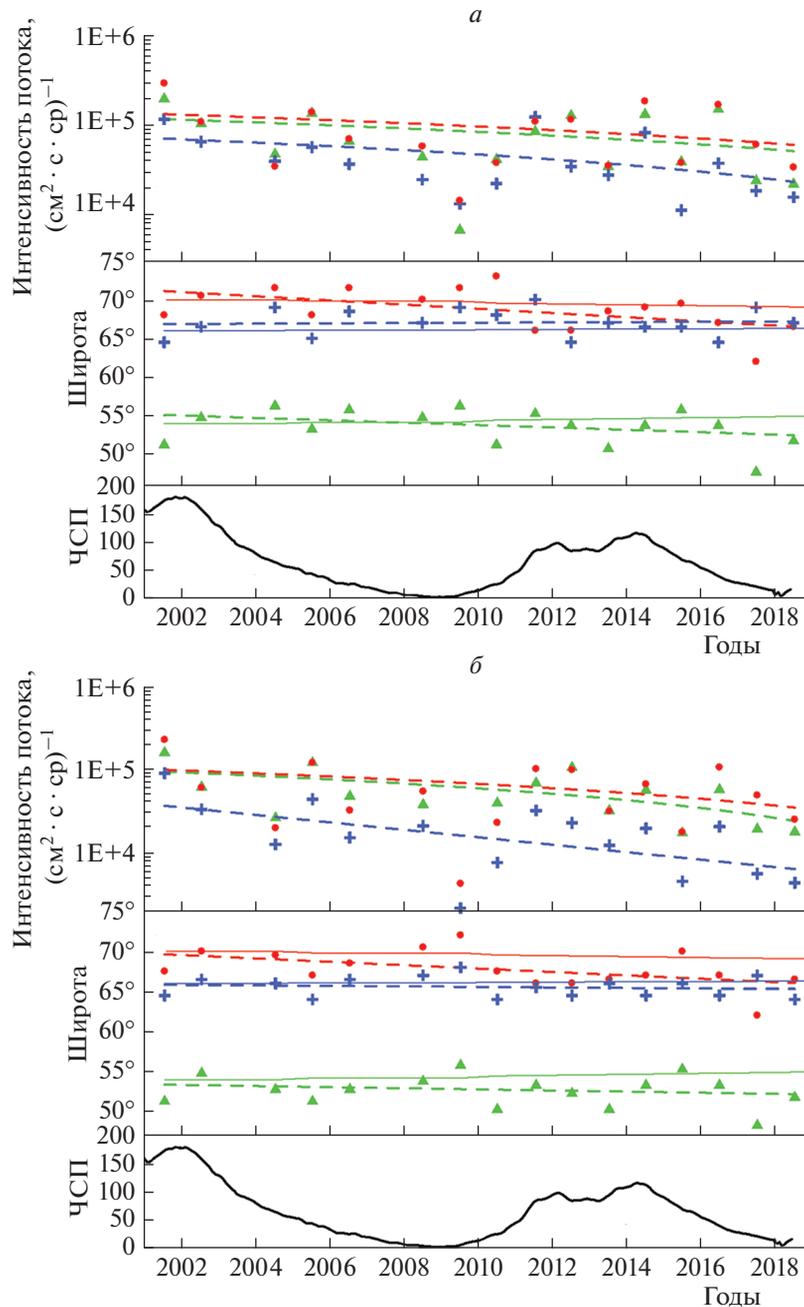


Рис. 6. Солнечно-циклическая вариация максимума РПЗ на дневной стороне во время геомагнитно спокойных дней: *a* – для электронов с энергией >30 кэВ и *б* – для электронов энергией >100 кэВ. Панели показывают (сверху вниз): величину максимального потока электронов, широту максимума внешнего РПЗ и число солнечных пятен (ЧСП). Разные символы соответствуют разным долготным секторам: американский сектор на долготе -80° (треугольники), европейский сектор на долготе 0° (кресты) и сибирский сектор на долготе 100° (кружки). Штриховые кривые представляют собой линейную аппроксимацию потоков и положения максимума внешнего РПЗ. Сплошные кривые на средних панелях соответствуют предсказаниям модели IGRF-2012.

канском секторе широта максимума немного уменьшается, хотя модель IGRF 2012 предсказывает небольшое увеличение широты. В европейском секторе наблюдаемая и прогнозируемая широта максимума внешнего РПЗ практически не изменяется. В сибирском секторе обнаружилось ано-

мальное смещение максимума внешнего РПЗ к экватору на 4° . Это смещение больше, чем смещение на 1° , предсказанное моделью IGRF-12. Разница статистически значима. Вероятно, эта разница может быть обусловлена аномальной динамикой собственно геомагнитного поля Земли.

Дополнительную поддержку в пользу этого утверждения можно найти из результатов длительных магнитных наблюдений в Сибири, где были обнаружены значительные аномалии основного геомагнитного поля в долготном диапазоне 80° – 130° [31]. А именно, модель IGRF-12 предсказывала значение магнитного поля, на 300 нТл большее, чем измеренное наземными магнитными станциями, что близко к 0.5% от общей величины магнитного поля в этой области. Для геоид поля более сильное магнитное поле соответствует более высоким широтам.

Отметим, что самые большие широты максимума внешнего РПЗ (для электронов с энергией, большей 30 и 100 кэВ) наблюдались в европейском и сибирском секторах во время минимальной солнечной активности в 2009 году. Это согласуется с предыдущими результатами [19]. Следовательно, сильное уменьшение широты в сибирском секторе не может быть объяснено понижением солнечной активности. Этот факт может указывать на локальные изменения в геомагнитном поле, начавшиеся после 2010 года, что привело к дополнительному смещению внешнего РПЗ в сторону экватора в сибирском секторе.

3.3. Квазизахваченные электроны

Анализ возрастных потоков квазизахваченных электронов (с энергией больше 30 кэВ) под внутренним РПЗ на высотах ионосферы показал отчетливую солнечно-циклическую вариацию как вероятности таких событий, так и максимальных интенсивностей потоков. Вероятность возрастания потоков находится в противофазе с СА: она минимальна в максимуме циклов. При этом возрастания интенсивности потоков чаще наблюдаются на фазах спада и в минимуме СА. Интенсивность потоков также сильно возрастает на фазах спада СА. Минимальные потоки наблюдались в солнечном минимуме. Наибольшие потоки наблюдались в более мощном 23-м солнечном цикле.

Таким образом, фазы спада солнечной активности играют важную роль в процессах быстрой перестройки РПЗ, связанных, в частности, с глубокими инъекциями частиц. Это обусловлено специфическими характеристиками различных структур в солнечном ветре, воздействующих на магнитосферу Земли, которых становится значительно больше именно на фазах спада солнечной активности. Геоэффективные структуры солнечного ветра, характеризующиеся высокоскоростными потоками плазмы и сильными магнитными полями с направлением, противоположным геодиполю, доминируют в солнечном ветре на фазе

спада и вызывают мощные магнитные бури (супербури) и интенсивные авроральные суббури [32]. Следует отметить, что высокоскоростные потоки плазмы из солнечных корональных дыр регулярно воздействуют на магнитосферу и вызывают рекуррентные магнитные бури умеренной интенсивности. Последние исследования показали, что геоэффективность рекуррентных бурь также очень высока [33, 34]. Как правило, они сопровождаются высокой длительной авроральной активностью. При этом рекуррентные бури продолжают происходить и в минимуме солнечной активности.

Аналогичные закономерности обнаружены и для быстрых электронов, высыпающихся из внешнего РПЗ. Максимальные потоки наблюдаются как в максимумах, так и на фазах спада солнечной активности. Минимальные потоки наблюдаются в солнечном минимуме. Интенсивность потоков в текущем 24-м солнечном цикле меньше, чем в предыдущем, более мощном 23-м солнечном цикле. Таким образом, можно говорить о глобальном отклике магнитосферы и радиационных поясов на солнечную активность и условия в гелиосфере.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Последние результаты, полученные в химической физике атмосферы, ионосферы и магнитосферы показывают, что быстрые электроны из радиационного пояса Земли играют важную роль в процессах, связанных с ионизацией верхней атмосферы и ионосферы от экватора до высоких широт. В данной работе проведен анализ солнечно-циклической вариации потоков энергичных электронов РПЗ, наблюдаемых в ионосфере в течение двух солнечных циклов в период с 1998 по 2018 годы. Показано, что изменения РПЗ связаны как с солнечной активностью, так и с изменениями в собственно магнитном поле Земли.

Солнечная активность играет доминирующую роль в контроле потоков быстрых электронов из РПЗ. Причем максимальные потоки электронов наблюдаются чаще всего на фазах спада солнечной активности. Это связано с вкладом рекуррентной геомагнитной активности, контролируемой потоками быстрого солнечного ветра из корональных дыр на Солнце. Самые низкие потоки электронов обнаружены в глубоком минимуме СА 2009 года, когда воздействие корональных дыр минимально. В целом установлено, что потоки быстрых электронов во время текущего 24-го солнечного цикла слабее, чем в 23-ем цикле.

Анализ положения внешнего РПЗ показал, что над Сибирью наблюдается его аномальное сме-

шение на 4° к экватору, которое не предсказывается стандартной моделью. Это смещение объясняется ускорением векового изменения собственно магнитного поля Земли в этом регионе. Из рис. 6 видно, что уменьшение широты максимума внешнего РПЗ в сибирском секторе становится заметно после 2012 года. Анализ временного интервала с 1999 по 2015 годы [35] выявил три импульса во времени изменения среднеквадратичной величины векового ускорения: в 2006 году, в 2009 году и в 2012–2013 годы. Авторы [36] приписывают эти импульсы, или так называемые резкие геомагнитные рывки (джерки), изменениям магнитного поля, возникающим в ядре Земли.

Логично предположить, что аномальное смещение внешнего РПЗ может быть связано с геомагнитным джерком, произошедшим в 2012–2013 годах. Экваториальное смещение пояса на несколько градусов в сибирском секторе указывает на экваториальное смещение всех доменов во внешней магнитосфере, в том числе в области авроральных высыпаний. По-видимому, этот сдвиг способствует увеличению частоты появления среднеширотных полярных сияний в Сибири и, возможно, во всей России. Кроме того, ожидалось, что следующий джерк может произойти около 2016 года [35]. На сегодняшний день у нас нет отчетов о последних джерках. Но сильное уменьшение широты внешнего РПЗ, наблюдаемое в 2017 году, указывает на еще одно внезапное изменение геомагнитного поля. Этот важный вопрос является предметом дальнейших исследований.

Авторы благодарят команду Полярных орбитальных космических спутников NOAA POES за предоставление экспериментальных данных об энергетических частицах, ресурс CDAWEB за предоставление данных об условиях в гелиосфере и Всемирный центр данных по геомагнетизму в Киото за предоставление геомагнитных индексов и расчет модели IGRF-12. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема 0082–2019–0017, регистрационный номер № АААА–А19–119010990034–5). Работа А.В. Дмитриева поддержана грантом MOST 107-2111-M-008-011, частично грантом MOST-107-2923-M-008-001-MY3/18-55-52006MHT_a и научно-исследовательским фондом Национального центрального университета Тайваня. Работа А.В. Суворовой поддержана грантами MOST 107-2811-M-008-1514 и MOST 106-2111-M-008-030-MY3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dmitriev A.V., Jayachandran P.T., Tsai L.-C.* // J. Geophys. Res. Space Phys. 2010. V. 115. № A12. A12244.
2. *Golubkov M.G., Ozerov G.K., Adamson S.O. et al.* // Chem. Phys. 2015. V. 462. P. 28.
3. *Голубков Г.В., Манжелей М.И., Карпов И.В.* // Хим. физика. 2011. Т. 30. № 5. С. 55.
4. *Suvorova A.V., Dmitriev A.V., Tsai L.-C. et al.* // J. Geophys. Res. Space Phys. 2013. V. 118. № 7. P. 4672.
5. *Голубков Г.В., Иванов Г.К., Балашов Е.М. и др.* // ЖЭТФ. 1998. Т. 114. Вып. 1. С. 100.
6. *Голубков Г.В., Иванов Г.К.* // Хим. физика. 2003. Т. 22. № 10. С. 25.
7. *Golubkov G.V., Golubkov M.G., Ivanov G.K.* // The Atmosphere and Ionosphere: Dynamics, Processes and Monitoring / Eds. Bychkov V.L., Golubkov G.V., Nikitin A.I. New York: Springer, 2010. P. 1.
8. *Голубков Г.В., Иванов Г.К., Голубков М.Г.* // Хим. физика. 2005. Т. 24. № 6. С. 3.
9. *Голубков Г.В., Голубков М.Г., Манжелей М.И.* // Хим. физика. 2012. Т. 31. № 2. С. 31.
10. *Голубков Г.В., Голубков М.Г., Манжелей М.И.* // ДАН. 2013. Т. 452. № 5. С. 510.
11. *Голубков Г.В., Голубков М.Г., Манжелей М.И.* // Хим. физика. 2014. Т. 33. № 2. С. 64.
12. *Baker D.N., Jaynes A.N., Hoxie V.C. et al.* // Nature. 2014. V. 515. P. 531.
13. *Rees M.H.* // Planet. Space Sci. 1963. V. 466. № 11. P. 1209.
14. *Verkhoglyadova O.P., Tsurutani B.T., Mannucci A.J. et al.* // J. Geophys. Res. Space Phys. 2011. V. 116. № A9. A09325.
15. *Dmitriev A.V., Suvorova A.V., Klimenko M.V. et al.* // J. Geophys. Res. Space Phys. 2017. V. 122. № 2. P. 2398.
16. *Li X., Baker D.N., Kanekal S.G. et al.* // Geophys. Res. Lett. 2001. V. 28. № 20. P. 3827.
17. *Miyoshi Y., Kataoka R.* // J. Atmosph. Solar-Terr. Phys. 2011. V. 73. № 1. P. 77.
18. *Meredith N.P., Horne R.B., Lam M.M. et al.* // J. Geophys. Res. Space Phys. 2011. V. 116. № A5. A05223.
19. *Miyoshi Y.S., Jordanova V.K., Morioka A. et al.* // Space Weather. 2004. V. 2. № 10. S10S02.
20. *Suvorova A.V.* // J. Geophys. Res. Space Phys. 2017. V. 122. № 12. P. 12274.
21. *Evans D.S., Greer M.S.* Polar Orbiting Environmental Satellite Space Environment Monitor: 2. Instrument descriptions and archive data documentation Tech. Memo. v. 1.4. Colorado: NOAA Space Environ. Lab., 2004.
22. *Suvorova A.V., Dmitriev A.V.* // Cyclonic and Geomagnetic Storms: Predicting Factors, Formation and Environmental Impacts / Ed. Banks V.P. New York: NOVA Sci. Publ., Inc., 2015. P. 19.
23. *Красовский В.И., Кушнир Ю.М., Бордовский Г.А. и др.* // Искусственные спутники Земли. 1958. № 2. С. 59.

24. *Савенко И.А., Шаврин П.И., Писаренко Н.Ф.* // Там же. 1962. № 13. С. 75.
25. *Heikkila W.J.* // J. Geophys. Res. Space Phys. 1971. V. 76. P. 1076.
26. *Suvorova A.V., Dmitriev A.V., Tsai L.-C.* // Planet. Space Sci. 2012. V. 60. № 1. P. 363.
27. *Suvorova A.V., Huang C.-M., Tsai L.-C. et al.* // Adv. Space Res. 2015. V. 56. № 9. P. 2001.
28. *Suvorova A.V., Huang C.-M., Dmitriev A.V. et al.* // J. Geophys. Res. Space Phys. 2016. V. 121. № 6. P. 5880.
29. *Suvorova A.V., Huang C.-M., Matsumoto H. et al.* // J. Geophys. Res. Space Phys. 2014. V. 119. № 11. P. 9283.
30. *Zhao H., Baker D.N., Califf S. et al.* // J. Geophys. Res. Space Phys. 2017. V. 122. № 12. P. 12140.
31. *Gvishiani A., Lukianova R., Soloviev A. et al.* // Surv. Geophys. 2014. V. 35. № 5. P. 1123.
32. *Tsurutani B.T., Gonzalez W.D., Gonzalez A.L.C. et al.* // J. Geophys. Res. Space Phys. 1995. V. 100. № A11. P. 21717.
33. *Tsurutani B.T., Gonzalez W.D., Gonzalez A.L.C. et al.* // J. Geophys. Res. Space Phys. 2006. V. 111. № A7. A07S01.
34. *Gibson S.E., Kozyra J.U., de Toma G. et al.* // J. Geophys. Res. Space Phys. 2009. V. 114. № A9. A09105.
35. *Finlay C.C., Aubert J., Gillet N.* // Nat. Commun. 2016. V. 7. 10422.
36. *Chulliat A., Alken P., Maus S.* // Geophys. Res. Lett. 2015. V. 42. № 9. P. 3321.