

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫСЫПАНИЙ ИНТЕНСИВНЫХ ПОТОКОВ БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В ИОНОСФЕРЕ В 23-м И 24-м СОЛНЕЧНЫХ ЦИКЛАХ

© 2022 г. М. Г. Голубков^{1*}, А. В. Дмитриев^{2, 3}, А. В. Суворова³, Г. В. Голубков^{1, 4}

¹Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семёнова
Российской академии наук, Москва, Россия

²Национальный центральный университет, Чонгли, Тайвань

³Институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцина Московского государственного университета
им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁴Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия

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

Поступила в редакцию 10.01.2022;
после доработки 17.01.2022;
принята в печать 20.01.2022

Интенсивные высыпания быстрых электронов (с энергией в десятки кэВ) из радиационного пояса Земли (РПЗ) являются одним из важнейших источников ионизации в ионосфере и атмосфере. В настоящей работе проведен анализ пространственного распределения потоков электронов с энергией, большей 30 кэВ, на высоте 850 км с использованием максимально возможного на сегодняшний день объема статистических данных. Установлено, что область высыпаний электронов из внешней зоны РПЗ смещается над Северной Америкой к полюсу, а над Сибирью — к экватору. Причем в области Бразильской магнитной аномалии интенсивность потока быстрых электронов и ее площадь в 24-м солнечном цикле уменьшились по сравнению с 23-м циклом. На основе анализа распределения квазизахваченных электронов под радиационным поясом на низких широтах подтвержден механизм их быстрого радиального переноса из внешней зоны РПЗ к Земле. Полученные результаты в основном связаны с изменением конфигурации магнитного поля Земли, а также с уменьшением солнечной и геомагнитной активности в 24-м солнечном цикле.

Ключевые слова: ионосфера, радиационный пояс Земли, солнечный цикл.

DOI: 10.31857/S0207401X22050065

1. ВВЕДЕНИЕ

Радиационный пояс Земли (РПЗ) формируется быстрыми заряженными частицами (с энергией E от десятков кэВ и больше), которые проникают на низкие высоты и приводят к ионизации и возбуждению нейтральных атомов и молекул верхней атмосферы [1]. Быстрые электроны с энергиями $E > 30$ кэВ могут попадать в верхние слои атмосферы на высоты от 1000 до 50 км и ионизировать D-, E- и F-слои ионосферы [2]. Высыпание электронов сопровождается нагревом верхних слоев атмосферы [3], приводящим к ее подъему и изменению химического состава термосферы [4].

Радиационный пояс электронов состоит из внешней и внутренней зон. Внешний РПЗ содержит быстрые и релятивистские электроны (с энергиями E от десятков кэВ до нескольких МэВ), захваченные в магнитосфере [5, 6]. Электроны

внешнего РПЗ дрейфуют вокруг Земли на экваториальных расстояниях, больших трех радиусов Земли, и колеблются вдоль силовых линий геомагнитного поля. Большинство захваченных электронов характеризуются питч-углами вблизи 90° и колеблются в непосредственной близости от геомагнитного экватора. Электроны с малыми питч-углами могут высыпаться в ионосферу и верхнюю атмосферу на средних и высоких широтах, что приводит к нагреву атмосферы. В свою очередь, нагрев атмосферы формирует нейтральные ветры, направленные к экватору, которые переносят возмущения в ионосфере и термосфере на более низкие широты [7]. В результате высыпание электронов на высоких широтах влияет на всю ионосферу, включая высокие и экваториальные широты.

Основным источником быстрых электронов (с $E > 30$ кэВ) во внешнем РПЗ является ускорение горячей плазмы магнитосферного хвоста во вре-

мя суббурь [8]. Продолжительные периодические магнитные бури связаны с высокоскоростными потоками солнечного ветра, которые характеризуются альфвеновскими волнами большой амплитуды в межпланетном магнитном поле [9]. Кроме того, магнитные бури сопровождаются непрерывной суббуревой активностью, ускорением электронов и высыпаниями, которые оказывают постоянное внешнее воздействие на атмосферу, термосферу и ионосферу [10]. Общее число и мощность магнитных бурь, а также интенсивность потоков электронов внешнего РПЗ выше в более активных солнечных циклах.

Электроны внутреннего радиационного пояса Земли обладают энергиями в десятки-сотни кэВ. На экваторе он простирается на расстояния, составляющие от 1.2 до 2.5 земных радиусов. Вследствие наклона оси земного диполя и его сдвига относительно оси Земли внутренний РПЗ опускается на низкие высоты в области Бразильской магнитной аномалии (БМА), где постоянно фиксируются интенсивные потоки заряженных частиц. Сдвиг диполя, как следует из длительных наблюдений геомагнитного поля, непрерывно уменьшается, поэтому на высотах внутреннего РПЗ потоки частиц и площадь БМА со временем также уменьшаются [11]. С другой стороны, на величину площади БМА влияют потери энергии частиц на ионизацию в атмосфере. Во время высокой солнечной и геомагнитной активности атмосфера разогревается и поднимается, что приводит соответственно к усилению потерь и уменьшению площади БМА. В то же время при низкой солнечной активности эта площадь, наоборот, увеличивается [12].

На низких широтах и высотах в несколько сотен километров, т.е. ниже внутреннего РПЗ, также наблюдаются спорадические интенсивные потоки быстрых электронов с энергиями $10 < E < 300$ кэВ [13, 14]. Здесь электроны дрейфуют поперек геомагнитного поля по долготе на восток и менее чем за 20 ч достигают БМА, где опускаются на высоты ниже 100 км, что приводит к их гибели вследствие термализации из-за потерь энергии на ионизацию. Такие электроны называются квазизахваченными, так как срок их жизни ограничен всего одним оборотом вокруг Земли. В работе [15] было показано, что источником этих электронов является внутренний РПЗ. Однако механизм их транспорта из РПЗ до конца исследован не был. Таким образом, быстрые электроны на низких широтах способны проникать в ионосферу и атмосферу практически на любых долготах, а не только в области БМА.

Цель настоящей работы — определение пространственного распределения высыпаний быстрых электронов из РПЗ в ионосферу по данным

непрерывных низкоорбитальных спутниковых наблюдений в период 23-го и 24-го солнечных циклов (т.е. с 1998 по 2019 гг.) на основе самого большого объема статистических данных, имеющихся на сегодняшний день. Кроме того, по данным о распределении квазизахваченных электронов установлен механизм их появления под внутренним РПЗ на высоте 850 км и быстрого радиального переноса к Земле. Проведенное исследование является последовательным развитием статистического анализа динамики заряженных частиц РПЗ, представленного в наших предыдущих работах [1, 16].

2. ДАННЫЕ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

С 1998 г. по настоящее время высыпания быстрых электронов из РПЗ постоянно наблюдаются низкоорбитальными полярными спутниками серии NOAA/POES [17]. Спутники имеют солнечно-синхронную орбиту с наклоном в 98° на высоте около 850 км, что позволяет проводить наблюдения в фиксированном диапазоне местного времени. В табл. 1 приведены период времени функционирования спутников и диапазоны местного времени (LT). Видно, что три пары спутников движутся преимущественно в трех орбитальных плоскостях, покрывающих диапазоны терминаторов в 6 и 18 LT, утро—вечер в 9 и 21 LT и ночь—день в 2 и 14 LT. На спутниках POES установлены детекторы для регистрации быстрых электронов и протонов, приходящих с различных направлений. В нашем случае использовался детектор электронов, направленный в зенит. Электроны регистрировались в трех интегральных каналах: $E > 30$ кэВ, $E > 100$ кэВ и $E > 300$ кэВ.

На низких широтах, где силовые линии магнитного поля расположены почти горизонтально, детектор фиксирует квазизахваченные частицы, которые быстро термализуются в верхних слоях атмосферы: во время азимутального дрейфа на восток их дрейфовые оболочки опускаются на высоты, обладающие плотной атмосферой в области БМА. На больших широтах, где силовые линии почти вертикальны, детектор регистрирует электроны, высыпающиеся из внешней зоны РПЗ в конус потерь и проникающие на высоты нижней ионосферы и верхней атмосферы.

Для численного анализа высыпаний интенсивных потоков электронов с энергиями $E > 30$ кэВ определялись максимальные потоки в пространственных ячейках $3^\circ \times 2^\circ$ географической долготы и широты соответственно [18, 19]. В результате были построены пространственные распределения потоков электронов с интенсивностью $I > 10^4$ (см² · с · ср)⁻¹ и частоты наблюдений таких потоков. При этом был использован

Таблица 1. Доступность данных со спутников NOAA/POES

Спутник	Интервал, гг	LT, ч	Диапазоны
P5	1998–2019	6 и 18	терминаторы
P6	2001–2014	6 и 18	терминаторы
P7	2002–2013	9 и 21	утро–вечер
P8	2005–2019	2 и 14	ночь–день
P9	2009–2019	2 и 14	ночь–день
P1	2014–2019	9 и 21	утро–вечер
P2	2006–2019	9 и 21	утро–вечер

массив данных, накопленный спутниками POES в период с 1998 по 2019 гг. Так, в 23-м солнечном цикле (с 1998 по 2009 г.) были учтены данные наблюдения 13773 дней, что соответствует 220368 виткам спутников, а в 24-м солнечном цикле (с 2010 по 2019 гг.) – 20157 дней, соответствующих 322512 виткам спутников.

Следует отметить, что до 2014 года спутниковые данные были получены с временным разрешением в 16 с, а после – с разрешением около 2 с. Таким образом, объем статистики событий увеличился почти в 10 раз. На сегодняшний день это является наиболее полным массивом данных по измерениям потоков быстрых электронов на низкой околоземной орбите.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

Пространственные распределения потоков электронов с энергиями $E > 30$ кэВ в географической системе координат для 23-го и 24-го солнечных циклов представлены на рис. 1. На высоких и средних широтах (с полярным углом $\theta > 40^\circ$) в северном и южном полушариях видны широкие полосы высыпаний из внешней зоны РПЗ с интенсивностями $I > 10^7$ ($\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср})^{-1}$. Сравнительный анализ показывает, что в 24-м солнечном цикле в северном полушарии на восточных долготах интенсивные высыпания расположены на более низких широтах (со смещением на несколько гра-

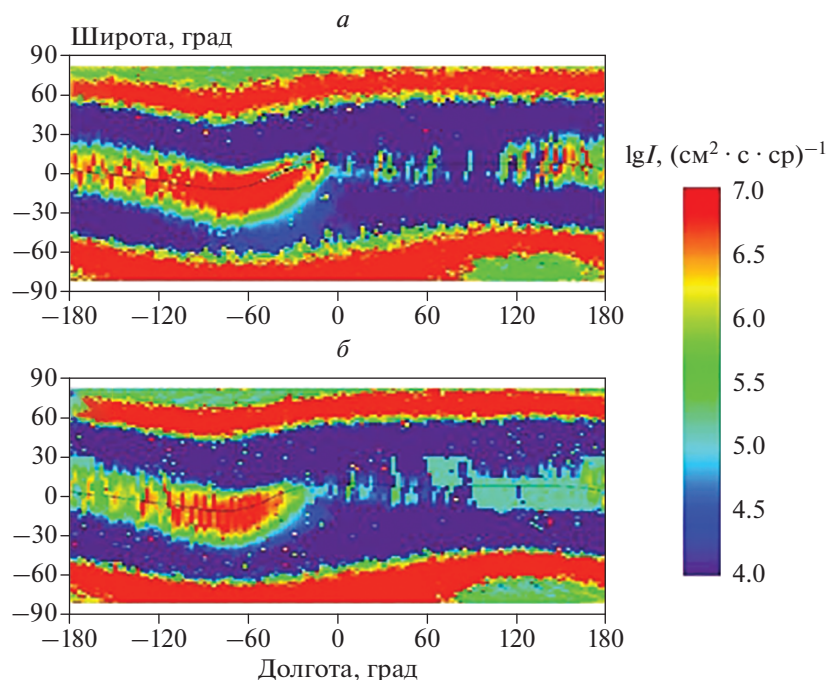


Рис. 1. Карты пространственного распределения максимальных потоков электронов с энергией $E > 30$ кэВ, высыпавшихся из радиационного пояса Земли, построенные по данным спутниковых измерений NOAA/POES на высоте 850 км: *а* – для 23-го солнечного цикла (с 1998 по 2009 гг.); *б* – для 24-го солнечного цикла (с 2010 по 2019 гг.). Магнитный экватор показан кривой черного цвета.

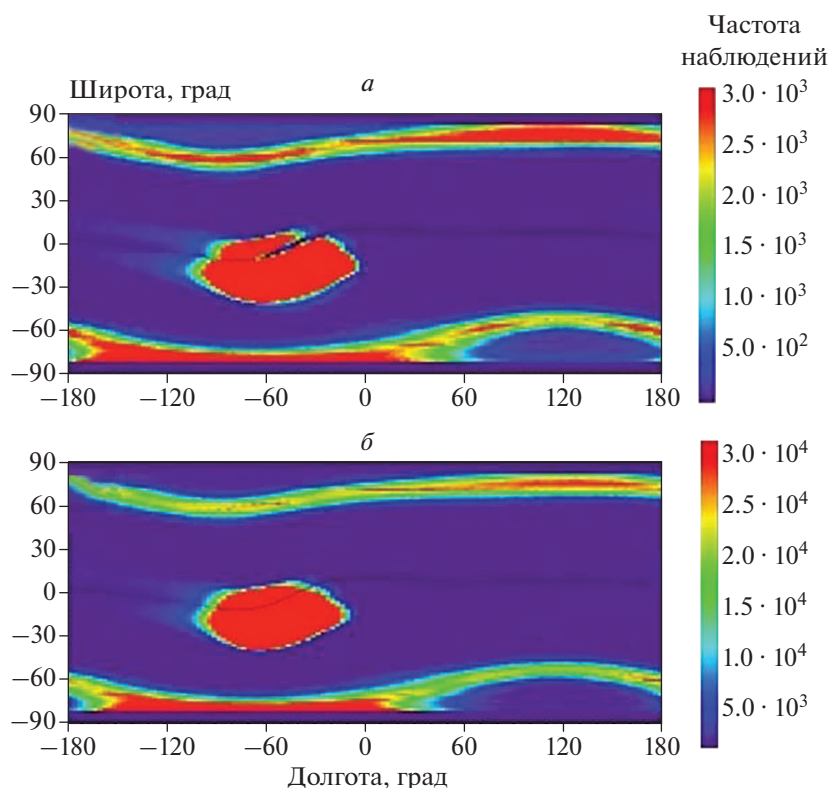


Рис. 2. Географические карты частоты появления интенсивных потоков электронов с энергией $E > 30$ кэВ, выпадающих из радиационного пояса Земли, построенные по данным спутниковых измерений NOAA/POES на высоте 850 км: *a* — для 23-го солнечного цикла (с 1998 по 2009 гг.); *б* — для 24-го солнечного цикла (с 2010 по 2019 гг.). Магнитный экватор показан кривой черного цвета.

дусов), чем в предыдущем солнечном цикле, что подтверждается выводами работы [1].

На низких широтах виден вклад потоков квазизахваченных электронов из внутренней области РПЗ, который растянулся вдоль геомагнитного экватора с максимумом в области азимутального угла $-100^\circ \leq \varphi \leq -20^\circ$, что соответствует БМА. Отметим, что потоки квазизахваченных электронов в 24-м цикле оказались заметно слабее, чем в 23-м, когда солнечная активность была значительно выше вследствие большего числа мощных магнитных бурь. Кроме того, наблюдается существенное уменьшение интенсивности потоков в области БМА.

Эффект уменьшения площади БМА наглядно демонстрируется на рис. 2, где сравниваются частоты появления интенсивных потоков электронов с $E > 30$ кэВ во время 23-го и 24-го солнечных циклов. Видно, что низкоширотная область в диапазоне $-100^\circ \leq \varphi \leq -20^\circ$, где интенсивные потоки наблюдаются наиболее часто, в 23-м цикле имеет существенно большую протяженность как по широтам, так и по долготам. Шлейф повышенного числа высыпаний перемещается на запад от БМА вдоль геомагнитного экватора. Ши-

ротная протяженность и интенсивность этого шлейфа заметно выше в 23-м цикле. Из рис. 2 также видно, что на высоких широтах область интенсивных потоков во внешней зоне РПЗ смещается над Северной Америкой к полюсу, а над Сибирью — к экватору. Поскольку объем статистики событий в 24-м солнечном цикле в 10 раз больше, чем в 23-м, то наблюдаемый эффект является статистически обеспеченным.

Детальное представление распределения интенсивных потоков квазизахваченных электронов на низких широтах приведено на рис. 3. Здесь объединены данные по двум солнечным циклам с 1998 по 2019 гг., что позволяет составить среднестатистическую картину динамики электронов и определить механизм их появления в запрещенной области под внутренней зоной РПЗ. Заметно различимы две области повышенных потоков. Первая находится над Африкой и простирается от восточной кромки БМА до долготы 60° (азимутальный угол $0^\circ \leq \varphi \leq 60^\circ$). Вторая область находится над Тихим океаном и простирается от долготы $\varphi = 100^\circ$ до западной границы БМА ($\varphi = -100^\circ$). Между этими областями располагаются зазоры, где потоки электронов довольно слабы и редки. Отметим,

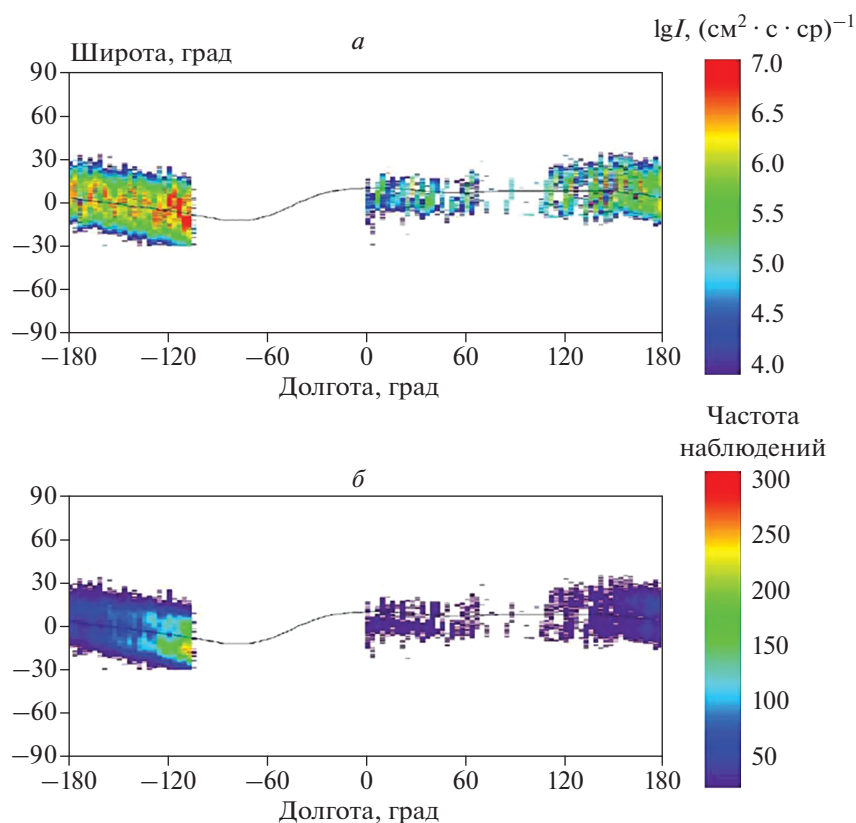


Рис. 3. Карты распределения максимальных потоков квазизахваченных электронов с энергией $E > 30$ кэВ на низких широтах (полярный угол $\theta < 40^\circ$), построенные по данным спутниковых измерений NOAA/POES на высоте 850 км в период 23-го и 24-го солнечных циклов (с 1998 по 2019 гг.): *a* — максимальные потоки электронов; *б* — частота событий в пространственной ячейке $3^\circ \times 2^\circ$ географической долготы и широты соответственно. Магнитный экватор показан кривой черного цвета.

что потоки квазизахваченных электронов над Африкой гораздо слабее, чем над Тихим океаном. Интенсивность потоков над Африкой и частота их появления уменьшаются на восток с удалением от БМА. В то же время потоки электронов над Тихим океаном как по интенсивности, так и по частоте событий растут с долготой, достигая максимума в области БМА (см. рис. 3).

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ пространственного распределения интенсивных высыпаний быстрых электронов с $E > 30$ кэВ из внешней зоны РПЗ на средних и высоких широтах северного полушария показал, что в 24-м солнечном цикле область высыпаний над Северной Америкой смещается к полюсу, а над Сибирью — к экватору. Впервые такая динамика была обнаружена ранее в работе [20]. Этот эффект можно объяснить ускоренным сдвигом северного магнитного полюса от Канады в сторону Сибири, в результате чего интенсивные высыпания быстрых электронов из внешней зоны РПЗ и дискрет-

ные полярные сияния начали наблюдаться в среднеширотной части России.

Вместе с тем на низких широтах обнаружено существенное уменьшение числа и интенсивности потоков электронов, а также площади БМА. Этот эффект нельзя объяснить уменьшением солнечной активности в 24-м солнечном цикле, поскольку оно должно приводить к усилению электронных потоков и увеличению площади БМА [12]. С другой стороны, благодаря ускоренному изменению геомагнитного поля Земли, напряженность магнитного поля в районе БМА увеличивается, что приводит к подъему нижней кромки внутренней зоны РПЗ на большие высоты, уменьшению потоков квазизахваченных частиц и площади БМА [11].

Анализ распределения квазизахваченных электронов на низких широтах позволил определить механизм их появления под внутренней РПЗ на высоте 850 км. Этот механизм напрямую связан с топологией магнитного поля Земли, имеющего на указанной высоте в области геомагнитного экватора минимальную напряженность в

районе БМА. Магнитное поле быстро растет на восток и достигает максимума в районе $60^\circ \leq \varphi \leq 100^\circ$. Далее напряженность поля начинает плавно спадать и возвращается к своему минимуму в БМА.

Если электроны начинают свое движение из области БМА и дрейфуют на восток, то они быстро движутся вдоль дрейфовых оболочек вверх на большие высоты в область меньшей напряженности поля, сохраняя при этом магнитный момент. Пройдя область максимальных высот, электроны начинают двигаться вниз и снова становятся видимыми на заданной высоте. При этом поток электронов не должен возрасти. Увеличение потока и частоты наблюдения быстрых электронов над Тихим океаном объясняется инжекцией частиц из внутренней зоны РПЗ. Полученное в данной работе распределение является надежным подтверждением механизма радиального переноса быстрых электронов из внутреннего РПЗ к Земле с последующим азимутальным дрейфом на восток [21].

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа данных непрерывных спутниковых наблюдений низкоорбитальных полярных спутников серии NOAA/POES в период 23-го и 24-го солнечных циклов (т.е. с 1998 по 2019 гг.) определено пространственное распределение высыпаний быстрых электронов с энергиями $E > 30$ кэВ из РПЗ в ионосферу. Установлено, что область высыпаний электронов из внешней зоны РПЗ смещается над Северной Америкой к полюсу, а над Сибирью — к экватору, т.е. в 24-м солнечном цикле в северном полушарии на восточных долготах интенсивные высыпания расположены на более низких широтах (смещение на несколько градусов), чем в предыдущем солнечном цикле. Это хорошо согласуется с последними данными о динамике северного геомагнитного полюса.

Проведенное сравнение данных спутниковых наблюдений указывает на то, что интенсивность потоков быстрых электронов в области БМА и площадь самой БМА существенно уменьшились в 24-м солнечном цикле по сравнению с 23-м, что может быть вызвано в первую очередь изменением геомагнитного поля Земли на низких широтах, а также уменьшением геомагнитной активности.

Полученное в данной работе распределение квазизахваченных электронов на низких широтах позволяет подтвердить механизм их появления под внутренней зоной РПЗ на высоте 850 км и радиального переноса из внутреннего РПЗ по направлению к Земле с последующим азимутальным дрейфом на восток. Последнее особенно важно учитывать для повышения устойчивости работы глобальных на-

вигационных спутниковых систем и дистанционного зондирования Земли [22–25].

Авторы благодарят подразделение Полярных орбитальных космических спутников NOAA/POES за предоставление экспериментальных данных о высокоэнергетичных частицах.

Работа выполнена в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (регистрационный номер 122040500060-4). Работа А.В. Дмитриева поддержана грантом MOST 108-2111-M-008-035, частично грантом MOST 110-2111-M-008-013 и научно-исследовательским фондом Национального центрального университета Тайваня.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голубков Г.В., Дмитриев А.В., Суворова А.В. и др. // Хим. физика. 2019. Т. 38. № 10. С. 72.
2. Dmitriev A.V., Jayachandran P.T., Tsai L.C. // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2010. V. 115. № A12. A12244.
3. Rees M.H. // Planet. Space Sci. 1963. V. 11. № 10. P. 1209.
4. Verkhoglyadova O.P., Tsurutani B.T., Mannucci A.J. et al. // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2011. V. 116. № 9. A09325.
5. Baker D.N., Jaynes A.N., Hoxie V.C. et al. // Nature. 2014. V. 515. № 7528. P. 531.
6. Панасюк М.И., Подзолко М.В., Ковтюх А.С. и др. // Космич. исслед. 2017. Т. 55. № 2. С. 85.
7. Dmitriev A.V., Suvorova A.V., Klimenko M.V. et al. // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2017. V. 122. № 2. P. 2398.
8. Liu J., Angelopoulos V., Frey H. et al. // Ann. Geophys. 2009. V. 27. № 5. P. 1831.
9. Tsurutani B.T., Gonzalez W.D. // Planet. Space Sci. 1987. V. 35. № 4. P. 405.
10. Verkhoglyadova O.P., Tsurutani B.T., Mannucci A.J. et al. // Ann. Geophys. 2013. V. 31. № 2. P. 263.
11. Thébaud E., Finlay C.C., Beggan C.D. et al. // Earth. Planet. Space. 2015. V. 67. № 1. P. 79.
12. Domingos J., Jault D., Pais M.A. et al. // Earth. Planet. Sci. Lett. 2017. V. 473. P. 154.
13. Красовский В.И., Кушнир Ю.М., Бордовский Г.А. и др. // Искусств. спутн. Земли. 1958. № 2. С. 59.
14. Suvorova A.V., Dmitriev A.V., Tsai L.C. et al. // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2013. V. 118. № 7. P. 4672.
15. Suvorova A.V., Huang C.M., Matsumoto H. et al. // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2014. V. 119. № 11. P. 9283.
16. Голубков М.Г., Суворова А.В., Дмитриев А.В. и др. // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 10. С. 69.
17. Evans D.S., Greer M.S. Polar orbiting environmental satellite space environment monitor-2: Instrument descriptions and archive data documentation. NOAA

- Technical Memorandum. Version 1.4 Boulder: Space Environment Center, 2004.
18. *Suvorova A.V., Dmitriev A.V.* // Cyclonic and Geomagnetic Storms: Predicting Factors, Formation and Environmental Impacts / Ed. Banks V.P. N.Y.: NOVA Sci. Publ., 2015. P. 19.
19. *Suvorova A.V.* // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2017. V. 122. № 12. P. 12274.
20. *Dmitriev A.V.* // Ann. Geophys. 2019. V. 37. № 4. P. 719.
21. *Suvorova A.V., Tsai L.C., Dmitriev A.V.* // Planet. Space Sci. 2012. V. 60. № 1. P. 363.
22. *Kuverova V.V., Adamson S.O., Berlin A.A. et al.* // Adv. Space Res. 2019. V. 64. № 10. P. 1876.
23. *Golubkov G.V., Manzhelii M.I., Berlin A.A. et al.* // Atmosphere. 2020. V. 11. № 6. 650.
24. *Голубков Г.В., Манжелей М.И., Берлин А.А. и др.* // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 3. С. 86.
25. *Родионов А.И., Родионов И.Д., Родионова И.П. и др.* // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 10. С. 61.