

УДК 550.380.12

ДОЛГОВРЕМЕННАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ЧАСТОТЫ ВЫСЫПАНИЙ МАГНИТОСФЕРНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В АТМОСФЕРУ ЗЕМЛИ

© 2019 г. Г. А. Базилевская¹, *, М. С. Калинин¹, М. Б. Крайнев¹, В. С. Махмутов¹,
А. К. Свиржевская¹, Н. С. Свиржевский¹, Ю. И. Стожков¹, Б. Б. Гвоздевский²

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт имени П.Н. Лебедева
Российской академии наук, Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Полярный геофизический институт
Российской академии наук, Мурманск, Россия

*E-mail: bazilevskayaga@lebedev.ru

Поступила в редакцию 15.09.2018 г.

После доработки 06.11.2018 г.

Принята к публикации 28.01.2019 г.

Измерения потоков ионизирующего излучения в атмосфере Земли, проводимые в ФИАН с 1957 г. по настоящее время, позволяют регистрировать рентгеновское излучение, генерированное в атмосфере высыпаящимися магнитосферными электронами с энергией выше 100 кэВ. Эти высыпания большей частью связаны с высокоскоростными потоками солнечного ветра и часто наблюдаются на спадающей ветви 11-летнего солнечного цикла. Они демонстрируют 27-дневную и сезонную повторяемость и коррелируют с геомагнитными возмущениями и потоками релятивистских электронов внешнего радиационного пояса. С 1961 г. по настоящее время в Мурманской области (параметр Мак-Илвайна $L \approx 5.5$) зарегистрировано более 500 случаев высыпаний. В частоте высыпаний обнаружен долговременный возрастающий тренд, который не коррелирует с параметрами солнечной и геомагнитной активности. Предположительно этот тренд может быть связан с влиянием на волновую активность магнитосферы наземных радиопередатчиков ОНЧ диапазона.

DOI: 10.1134/S0367676519050107

ВВЕДЕНИЕ

Высыпания магнитосферных электронов в атмосферу Земли являются одним из механизмов опустошения внешнего радиационного пояса Земли. Процессы ускорения и потерь электронов в поясе управляются солнечной активностью. Энергия солнечного ветра усиленно поступает в магнитосферу на фоне отрицательного значения B_z -компоненты межпланетного магнитного поля (ММП), что приводит к изменению конфигурации магнитосферы и ее токовых систем, а также к усилению волновой активности и взаимодействий волна—частица. В результате создаются благоприятные условия для конкурирующих процессов ускорения и потерь электронов. Несмотря на усилия, направленные на понимание этих процессов, для чего выполняется ряд специализированных миссий в околоземном пространстве, например, Van Allen probes [1], MMS [2] и на баллонах в атмосфере [3, 4], относительная роль различных физических механизмов до сих пор не выяснена. Не до конца ясной остается роль, которую играют высыпаящиеся магнитосферные электроны в химических реакциях в атмосфере, приводящих к

динамике содержания озона и изменениям температуры в стратосфере и мезосфере (например, [5]).

Регистрация высыпаний высокоэнергичных электронов (ВВЭ) из магнитосферы в Мурманской области (параметр Мак-Илвайна $L \approx 5.5$) производится Физическим институтом им. П.Н. Лебедева РАН с 1961 г. Измерения проводятся в атмосфере с помощью радиозонда, поднимаемого метеорологической оболочкой. Методика эксперимента неоднократно описывалась [6, 7] и позволяет регистрировать высыпаящиеся электроны с энергией выше 100 кэВ. Наши данные являются самым длинным однородным рядом данных и позволяют исследовать долговременные вариации в частоте ВВЭ.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫСЫПАНИЙ МАГНИТОСФЕРНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

В данной статье мы суммируем свойства ВВЭ, установленные в результате анализа данных каталога [7], включающего более 500 событий ВЭ, зарегистрированных с 1961 г. Высыпания связаны с высокоскоростными потоками солнечного ветра и происходят преимущественно на спадающей

Таблица 1. Результаты анализа методом наложения эпох. Нуль-дни – даты регистрации ВВЭ

Параметр	Эффект	Сдвиг относительно 0-дня	Параметр	Эффект	Сдвиг относительно 0-дня
V	Макс.	–1	Температура	Макс.	0
V_z	Мин.	0	Dst	Мин.	0
V	Макс.	0	AE	Макс.	0
Плотность	Мин.	+1	$-V \cdot B_z$	Макс.	0
Давление	Макс.	–1	EI > 2 МэВ	Макс.	+1

ветви 11-летнего солнечного цикла. Максимальная частота ВВЭ наблюдалась в 1968, 1974, 1984, 1994, 2003 и 2015 гг. Анализ, выполненный методом наложения эпох, показал устойчивую связь появления ВВЭ с характеристиками межпланетной плазмы – индукцией межпланетного магнитного поля (ММП) V и его компонентой V_z , скоростью солнечного ветра V , плотностью и температурой плазмы, динамическим давлением и другими характеристиками, а также с геомагнитными индексами [8] и потоками релятивистских электронов во внешнем радиационном поясе [9]. В качестве 0-дня использовались даты наблюдения ВВЭ. Во всех перечисленных случаях параметры демонстрировали явный эффект (минимум или максимум) с некоторым сдвигом (минимум или максимум) с некоторым сдвигом [10]. Результаты этого анализа отражены в табл. 1. Поведение параметров межпланетной плазмы характерно для геомагнитных возмущений, связанных с высокоскоростными потоками солнечного ветра и короткими областями взаимодействия [11, 12]; более того, аналогичные связи обнаружены при исследовании динамики внешнего радиационного пояса по результатам наблюдений Van Allen Probe [13].

Изучение последовательности событий, связанных с ВВЭ, привело к наиболее вероятному сценарию их появления [14, 15]. Прибытие на орбиту Земли высокоскоростного потока солнечного ветра на фоне отрицательного V_z означает усиленное поступление в магнитосферу энергии солнечного ветра. Начинается геомагнитная буря. Высокоскоростной поток всегда несет с собой возмущения, которые поступают в магнитосферу, пока сохраняется высокая скорость солнечного ветра, что затягивает фазу восстановления бури. Поступление новой энергии, нарушение конфигурации магнитного поля, изменение токов, усиление конвекции магнитосферной плазмы и неустойчивостей приводят к активизации волновой активности в магнитосфере и усилению процессов взаимодействия волна–частица, а значит, к ускорению и рассеянию электронов в поясе. Высыпания начинаются с началом магнитной бури и продолжаются во время фазы восстановления. Около 40% наблюдаемых нами ВВЭ проис-

ходят сериями длительностью меньше 10 дней. Хотя описанная последовательность событий довольно типична и совпадает с общепринятыми представлениями, поступление энергии в магнитосферу происходит постоянно, что ведет к суббуревой активности и, в конечном итоге, тоже к ускорению и потерям электронов [16].

ДОЛГОВРЕМЕННАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ЧАСТОТЫ ВВЭ

Во время проведения эксперимента частота запусков радиозонда не оставалась постоянной. Для изучения временного хода частоты ВВЭ была проведена нормировка годовых значений числа случаев ВВЭ: $N_{in} = N_{io} N_{94f} / N_{if}$, где N_{in} и N_{io} – нормированное и реально зарегистрированное число случаев ВВЭ в i -ом году, N_{94f} и N_{if} – полное число полетов радиозондов, достигших высоты 26.5 км ($20 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$), в 1994 и в i -ом году соответственно. Высота 26.5 км была выбрана, потому что ниже нее наблюдалось лишь 5% случаев ВВЭ. Нормировка производилась к 1994 г., потому что в этом году наблюдалось наибольшее число ВВЭ. Дни, когда в стратосферу вторгались солнечные протоны, были исключены из рассмотрения.

Нормированный ряд частоты ВВЭ сохранил зависимость от фазы солнечного цикла (максимумы на ветви спада), но неожиданно выявил возрастающий тренд в частоте ВВЭ (рис. 1а). Начиная с 1960-х годов число ВВЭ в каждом последующем максимуме возрастало. Поведение годовых значений различных параметров, которые, как было показано методом наложения эпох, сопутствуют ВВЭ, представлено на рис. 1б–1е кривыми с различными символами; линии без символов – сглаживание по 11 точкам. До 1990 г. возрастание частоты ВВЭ можно объяснить ростом солнечной активности, но начиная с 22-го цикла активность Солнца падает (рис. 1б), и этот тренд отразился в ходе магнитосферных индексов Dst и AE (рис. 1г, 1д). Наилучшая корреляция частоты ВВЭ наблюдается со скоростью солнечного ветра. Хотя локальные максимумы числа ВВЭ совпадают с максимумами скорости солнечного ветра, сглаженные значения V почти не имеют тренда,

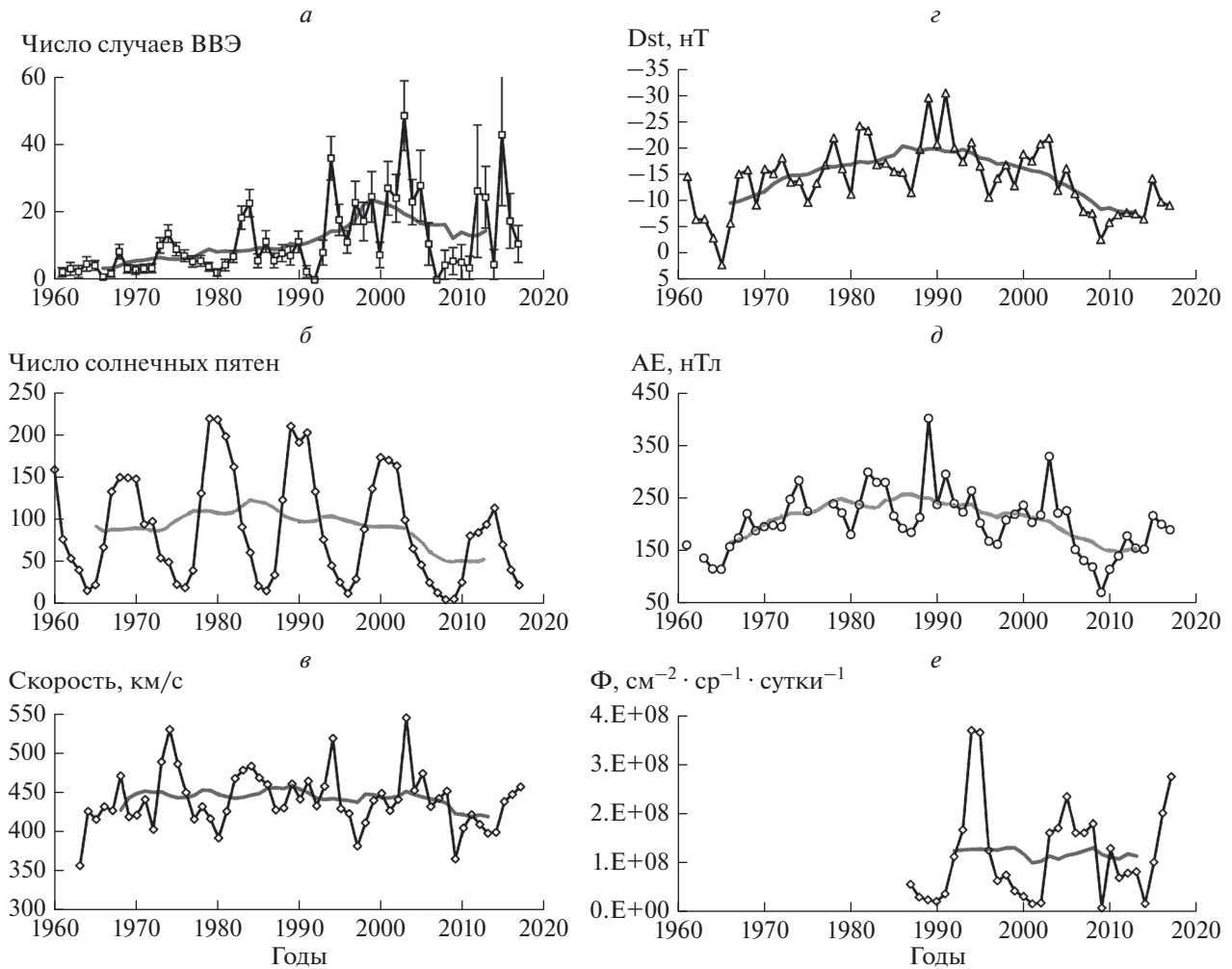


Рис. 1. Временной ход: *a* – числа случаев ВВЭ, *б* – числа солнечных пятен, *в* – скорости солнечного ветра, *г* – Dst-индекса, *д* – АЕ-индекса, *е* – флюенса электронов с энергией больше 2 МэВ на геостационарной орбите. Кривые с символами – годовые значения параметров, серые кривые без символов – значения, сглаженные по 11 точкам.

по крайней мере, до середины 2000-х, после чего намечается спад (рис. 1*в*).

Расхождение в знаках трендов большинства параметров и тренда ВВЭ особенно ясно видно в начале 1990-х годов. Поэтому мы проанализировали свойства наблюдаемых ВВЭ отдельно в 1961–1991 гг. и в 1992–2017 гг. Повторно был проведен анализ методом наложения эпох, проверено распределение случаев ВВЭ относительно начала геомагнитной бури (минимума Dst), проверена 27-дневная и сезонная повторяемость. Все свойства ВВЭ до и после 1991 г. были одинаковыми. Также не было найдено изменений в условиях проведения эксперимента, которые могли бы отразиться на отношении числа полетов радиозонда с наблюдаемыми ВВЭ к общему числу полетов радиозонда.

Мы наблюдаем ВВЭ, которые по своим характеристикам не отличаются от ВВЭ, измеряемых в

других экспериментах (например, [2, 13]). Изменные характеристики событий позволяют считать временной ряд ВВЭ однородным. При этом мы наблюдаем возрастающий тренд в частоте ВВЭ с 1961 г., по крайней мере, до середины 2000-х годов. После этого рост, по-видимому, прекратился, но трудно сделать определенные выводы, т.к. сокращение числа полетов привело к очень большим ошибкам измерения (рис. 1*а*). Ни один из параметров солнечной и геомагнитной активности не демонстрирует тренд, найденный нами в частоте ВВЭ. Предположение, которое можно сделать, – это влияние наземных радиопередатчиков на ВВЭ. Имеется сеть наземных радиопередатчиков, работающих в ОНЧ-диапазоне. К этому диапазону относятся естественные волны в магнитосфере, которые интенсивно взаимодействуют с частицами, нарушая адиабатические инварианты [17]. Излучение наземных пере-

датчиков может проникать в магнитосферу и влиять на ВВЭ в районах вблизи передатчиков [18–20]. В Мурманской области такие передатчики имеются [21]. Число таких передатчиков, обслуживающих военно-морские коммуникации, может расти. Кроме того, излучение мощных ВЧ-стандов, разработанных для воздействия на ионосферу [17], проникает в магнитосферу и служит триггером (источником) других волн, в том числе ОНЧ.

Нужно отметить, что имеющаяся информация о ВВЭ, инициированных передатчиками, относится к сравнительно низким широтам и ночному времени. Однако динамические волновые процессы в магнитосфере настолько сложны, что нельзя исключить воздействия антропогенного излучения на ВВЭ, наблюдаемые нашей группой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Однородный ряд случаев высыпаний магнитосферных электронов с энергией >100 кэВ, зарегистрированных в полярной атмосфере, демонстрирует возрастающий тренд с 1960-х годов до середины 2000-х годов. Аналогичный тренд в сопутствующих межпланетных и магнитосферных процессах не наблюдается. Сделано предположение, что увеличение количества высыпаний связано с растущей активностью наземных радиопередатчиков.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты 16-02-00100_а, 17-02-00584_а, 18-02-00582_а).

Авторы выражают благодарность организациям и научным группам, предоставляющим свои данные через интернет: WDC-SILSO (Royal Observatory of Belgium, Brussels); GSFC/SPDF (OMNIWeb); NOAA NCEI (данные по электронам радиационного пояса).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Spence H.E., Reeves G.D., Baker D.N. et al. // Space Sci. Rev. 2013. V. 179. № 1–4. P. 311.*
2. *Burch J.L., Moore T.E., Torbert R.B., Giles B.L. // Space Sci. Rev. 2016. V. 199. № 1–4. P. 5.*
3. *Millan R.M., McCarthy M.P., Sample J.G. et al. // Space Sci. Rev. 2013. V. 179. № 1–4. P. 503.*
4. *Woodger L.A., Halford A.J., Millan R.M. et al. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2015. V. 120. № 6. P. 4922.*
5. *Andersson M.E., Verronen P.T., Marsh D.R. et al. // J. Geophys. Res. Atmos. 2018. V. 123. № 1. P. 607.*
6. *Stozhkov Yu.I., Svirzhevsky N.S., Bazilevskaya G.A. et al. // Adv. Space Res. 2009. V. 44. № 10. P. 1124.*
7. *Makhmutov V.S., Bazilevskaya G.A., Stozhkov Yu.I. et al. // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2016. V. 149. P. 258.*
8. ftp://spdf.gsfc.nasa.gov/pub/data/omni/low_res_omni/.
9. <https://www.ngdc.noaa.gov/stp/solar/sateenvi.html#electrons>.
10. *Базилевская Г.А., Калинин М.С., Квашиин А.Н. и др. // Геомагн. и аэрон. 2017. Т. 57. № 2. С. 164; Bazilevskaya G.A., Kalinin M.S., Krainev M.B. et al. // Geomagn. Aeron. 2017. V. 57. № 2. P. 147.*
11. *Borovsky J.E., Denton M.H. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2006. V. 111. № 7. Art. no. A07S08.*
12. *Kilpua E.K.J., Balogh A., von Steiger R., Liu Y.D. // Space Sci. Rev. 2017. V. 212. № 3–4. P. 1271.*
13. *Murphy K.R., Watt C.E.J., Mann I.R. et al. // Geophys. Res. Lett. 2018. V. 45. № 9. P. 3783.*
14. *Базилевская Г.А., Калинин М.С., Крайнев М.Б. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 2. С. 235; Bazilevskaya G.A., Kalinin M.S., Krainev M.B. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. № 2. P. 215.*
15. *Базилевская Г.А., Калинин М.С., Крайнев М.Б. и др. // Геомагн. и аэрон. 2018. Т. 58. № 4. С. 498; Bazilevskaya G.A., Kalinin M.S., Krainev M.B. et al. // Geomagn. Aeron. 2018. V. 58. № 4. P. 483.*
16. *Jaynes A.N., Baker D.N., Singer H.J. et al. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2015. V. 120. № 9. P. 7240.*
17. *Gombosi T.I., Baker D.N., Balogh A. et al. // Space Sci. Rev. 2017. V. 212. № 3–4. P. 985.*
18. *Sauvaud J.-A., Maggiolo R., Jacquy C. et al. // Geophys. Res. Lett. 2008. V. 35. Art. no. L09101.*
19. *Li X., Ma Y., Wang P. et al. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2012. V. 117. Art. no. A04201.*
20. *Nemec F., Cizek K., Parrot M. et al. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2017. V. 122. № 7. P. 7226.*
21. https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_VLF-transmitters.