ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2021, том 85, № 8, с. 1177–1179

УДК 523.165

ПОВЕДЕНИЕ ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫХ МАГНИТОСФЕРНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В 22–24 ЦИКЛАХ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

© 2021 г. О. Н. Крякунова[1, 2, *], А. В. Белов[3], А. А. Абунин[3], Н. Ф. Николаевский[1], М. А. Абунина[3], У. С. Байдельдинов[1], С. К. Султангазинов[1], Б. Б. Сейфуллина[1], И. Л. Цепакина[1]

[1]*Дочернее товарищество с ограниченной ответственностью "Институт ионосферы", Алматы, Казахстан*

[2]*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия*

[3]*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова Российской академии наук, Москва, Россия*

**E-mail: krolganik@yandex.ru*

Поступила в редакцию 25.02.2021 г.
После доработки 12.03.2021 г.
Принята к публикации 28.04.2021 г.

Рассмотрено поведение высокоэнергичных магнитосферных электронов с энергией >2 МэВ на геостационарной орбите в 22–24 циклах солнечной активности. Показано, что наибольшее количество электронных возрастаний происходит на фазе спада солнечной активности, когда наблюдается большее количество геоэффективных корональных дыр. Обнаружено, что в целом по данным 2003–2015 гг. наблюдается соответствие поведения количества электронных возрастаний и площади геоэффективных корональных дыр.

DOI: 10.31857/S0367676521080159

ВВЕДЕНИЕ

Исследование поведения высокоэнергичных магнитосферных электронов с энергией >2 МэВ на геостационарной орбите является актуальной задачей физики магнитосферы и космической погоды. Известно, что именно эти частицы представляют собой наибольшую опасность для функционирования как геостационарных, так и низкоорбитальных спутников с большим наклонением орбит [1–4]. Геостационарные спутники имеют много различий в конструкции, компонентах, средствах защиты от воздействия факторов космического пространства и операционных процедур. Некоторые спутники могут быть более восприимчивы к воздействию факторов космической среды, в частности, космической радиации, чем другие, но эта информация, как правило, недоступна. В связи с этим установить общий уровень опасности высокоэнергичных электронов для всех геостационарных спутников очень сложно. Большинство аномалий вызваны накоплением заряда внутри электронных компонентов, связанным с воздействием электронов высоких энергий [5]. В данной работе мы считали опасным электронное возрастание, когда суточный флюенс превосходил 10^8 электронов · (см^2 · ср · сут)$^{-1}$.

Исследование поведения высокоэнергичных магнитосферных электронов в циклах солнечной активности важно для проектирования космических аппаратов при расчете срока активного существования, т. к. для этого необходимо сделать оценки уровня основных негативных факторов космического пространства на ближайшие 10–15 лет, а значит иметь информацию о поведении высокоэнергичных электронов за длительный период [6].

КОЛИЧЕСТВО ЭЛЕКТРОННЫХ ВОЗРАСТАНИЙ В ЦИКЛАХ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Для исследования была создана база данных, включающая в себя значения потока высокоэнергичных электронов на геостационарной орбите с энергией >2 МэВ. Данные по высокоэнергичным электронам с космических аппаратов GOES взяты из базы данных OMNI [7].

По измерениям серии спутников GOES был составлен каталог электронных возрастаний за 1987–2015 гг., в который вошли возрастания, где суточный флюенс превосходил 10^8 электронов · · (см^2 · ср · сут)$^{-1}$.

Построим количество электронных возрастаний *Ne* по нашей выборке электронных возраста-

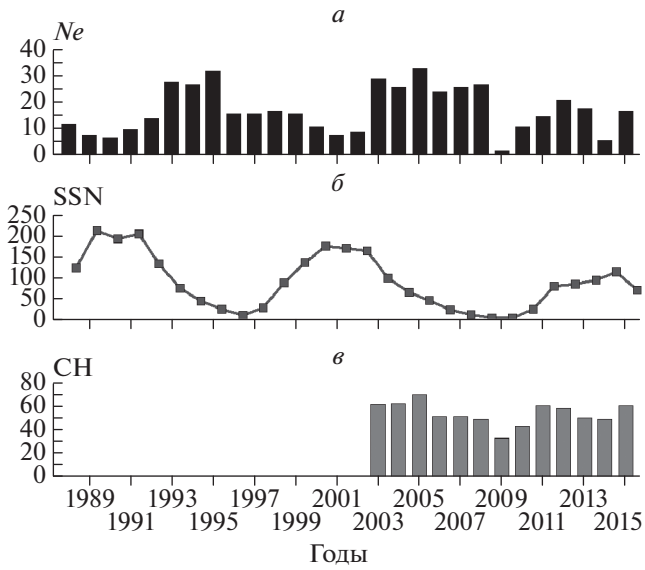

Рис. 1. Изменение количества электронных возрастаний и количества геоэффективных корональных дыр в 22–24 циклах солнечной активности: *а* – количество электронных возрастаний, *б* – количество солнечных пятен, *в* – количество геоэффективных корональных дыр.

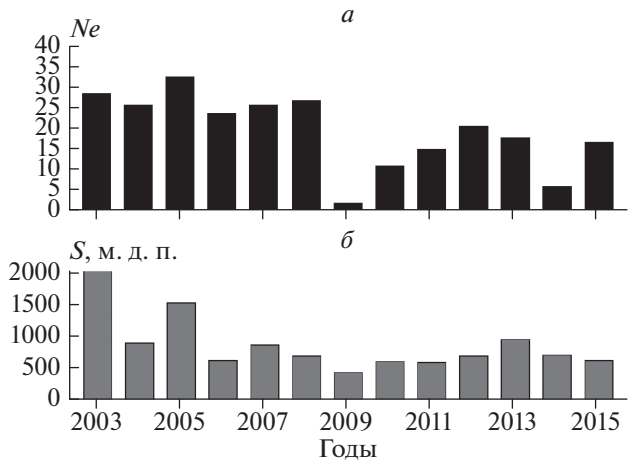

Рис. 2. Изменение количества электронных возрастаний и площади корональных дыр в 2003–2015 гг.: *а* – количество электронных возрастаний, *б* – площадь геоэффективных корональных дыр.

ний в циклах солнечной активности, представленных по числу солнечных пятен SSN, и количество корональных геоэффективных дыр CH [8] (рис. 1). Видно, что наибольшее количество электронных возрастаний происходит на фазе спада солнечной активности, когда геоэффективных корональных дыр тоже больше. На фазах спада и минимума солнечной активности существенно возрастает количество корональных дыр, являющихся источником высокоскоростного солнечного ветра [9], а высокоскоростной солнечный ветер приводит к повышению уровня магнитосферных высокоэнергичных электронов [6].

Можно сравнить количество электронных возрастаний в 2003–2015 гг. с площадью корональных дыр [10] (рис. 2). Видно, что в целом наблюдается хорошее соответствие поведения количества электронных возрастаний и площади геоэффективных корональных дыр в 2003–2015 гг.

В табл. 1 представлены результаты расчета количества электронных возрастаний на разных фазах солнечной активности. Видно, что количество электронных возрастаний в минимумах 22 и 23 циклов (39 и 55 возрастаний) значительно превосходит количество электронных возрастаний в максимумах циклов (25 и 31 возрастание). В максимуме 24 цикла зарегистрировано 51 возрастание, однако максимум самого цикла ниже по сравнению с предыдущими циклами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе базы данных высокоэнергичных магнитосферных электронов с энергией >2 МэВ на геостационарной орбите получено их изменение в 22–24 циклах солнечной активности. Показано, что на фазы спада приходится максимальное количество возрастаний электронов на геостационарной орбите. Количество электронных возрастаний в цикле солнечной активности хорошо коррелирует с количеством корональных геоэффективных дыр. Количество электронных возрастаний в минимумах 22 и 23 циклов значительно

Таблица 1. Количество электронных возрастаний на различных фазах 22–24 циклов солнечной активности

	Цикл 22		Цикл 23		Цикл 24	
	годы	*Ne*	годы	*Ne*	годы	*Ne*
Фаза подъема	1987.3–1989.0	22	1997.7–1999.5	27	2009.8–2011.3	16
Фаза максимума	1989.0–1992.0	25	1999.5–2002.7	31	2011.3–2014.8	51
Фаза спада	1992.0–1995.5	89	2002.7–2007.0	120	2014.8–2018.0	97
Фаза минимума	1995.5–1997.7	39	2007.0–2009.8	55		

превосходит количество электронных возрастаний в максимумах циклов.

Работа выполнена при поддержке Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (грант № AP08855916) и Российского научного фонда (проект № 20-72-10023).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Wrenn G.L., Rodgers D.J., Ryden K.A.* // Ann. Geophys. 2002. V. 20. P. 953.
2. *Wrenn G.L.* // J. Atm. Sol. Terr. Phys. 2009. V. 71. P. 1210.
3. *Belov A., Dorman L., Iucci N. et al.* Effects of space weather on technology infrastructure. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004. P. 147.
4. *Белов А.В., Крякунова О.Н., Абунин А.А. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 2. С. 244; *Belov A.V., Kryakunova O.N., Abunin A.A. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. No. 2. P. 244.
5. *Horne R.B., Glauert S.A., Meredith N.P. et al.* // Space Weather. 2013. V. 11. P. 169.
6. *Li X., Temerin M., Baker D.N. et al.* // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. Art. No. A11207.
7. http://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html.
8. http://www.solen.info/solar/coronal_holes.html.
9. *Kryakunova O., Belov A., Abunin A. et al.* // J. Phys. Conf. Ser. 2015. V. 632. Art. No. 012062.
10. *Tlatov A., Tavastsherna K., Vasil'eva V.* // Sol. Phys. 2014. V. 289. No. 4. P. 1349.

The behavior of high-energy magnetospheric electrons in 22–24 solar activity cycles

O. N. Kryakunova[a, b, *], A. V. Belov[c], A. A. Abunin[c], N. F. Nikolayevskiy[a], M. A. Abunina[c], U. S. Baideldinov[a], S. K. Sultangazinov[a], B. B. Seifullina[a], I. L. Tsepakina[a]

[a] *Institute of Ionosphere, Almaty, 050020 Kazakhstan*

[b] *Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia*

[c] *Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences, Moscow, 108840 Russia*

**e-mail: krolganik@yandex.ru*

The behavior of high-energy magnetospheric electrons with an energy >2 MeV in geostationary orbits in 22–24 solar activity cycles is considered. It is shown that the largest number of electron increases occurs in the declining phase of solar activity cycles, when there are more geoeffective coronal holes. It was obtained that in general in 2003–2015 there is a correspondence between the behavior of the number of electron increases and the square of geoeffective coronal holes.