

УДК 523.165

## СТАТИСТИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ ФЛЮЕНСА МАГНИТОСФЕРНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ БОЛЕЕ 2 МэВ С ГЕОМАГНИТНЫМИ И МЕЖПЛАНЕТНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ В 1987–2021 гг.

© 2022 г. О. Н. Крякунова<sup>1, 2, \*</sup>, А. В. Белов<sup>3</sup>, А. Ф. Яковец<sup>1</sup>, А. А. Абуни<sup>3</sup>, И. Л. Цепакина<sup>1</sup>, Б. Б. Сейфуллина<sup>1</sup>, М. А. Абунина<sup>3</sup>, Н. Ф. Николаевский<sup>1</sup>, Н. С. Шлык<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Дочернее товарищество с ограниченной ответственностью  
“Институт ионосферы”, Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
“Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук”, Москва, Россия

<sup>3</sup>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 29.07.2022 г.

После доработки 15.08.2022 г.

Принята к публикации 22.08.2022 г.

По данным за 35 лет (1987–2021 гг.) измерений потоков магнитосферных электронов с энергией более 2 МэВ на геостационарных орбитах, скорости солнечного ветра и геомагнитной активности рассчитаны коэффициенты корреляции между суточным флюенсом электронов, скоростью солнечного ветра и  $A_p$ -индексом геомагнитной активности с различными временами запаздывания, а также между флюенсами электронов, рассчитанными в соседние дни. Разработана трехпараметрическая модель, позволяющая прогнозировать флюенс высокоэнергичных магнитосферных электронов на следующие сутки, основанная на предыстории поведения флюенса, данных об  $A_p$ -индексе геомагнитной активности и измерениях скорости солнечного ветра. Модельные расчеты хорошо согласуются с экспериментальными данными с высоким коэффициентом корреляции (0.82) для всего периода 1987–2021 гг.

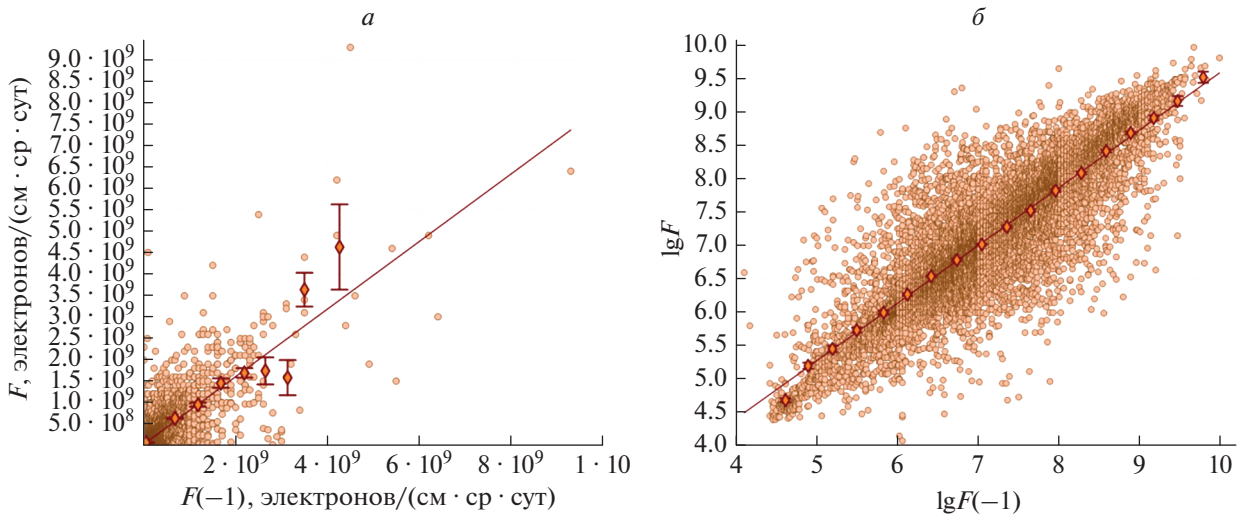
DOI: 10.31857/S0367676522120213

### ВВЕДЕНИЕ

Исследование связи потоков релятивистских электронов в радиационном поясе с различными параметрами межпланетной среды началось довольно давно, когда в статье [1] были рассмотрены корреляции между потоками электронов различных энергий  $>0.7$ ,  $>1.55$  и  $>3.9$  МэВ, скоростью солнечного ветра ( $V_{sw}$ ), межпланетным магнитным полем и другими межпланетными параметрами. Была обнаружена корреляция потоков электронов радиационного пояса с  $V_{sw}$ . Зависимость потока электронов от скорости солнечного ветра и состояния межпланетного поля рассматривалась и в работах [2–5]. Однако в работе [6] на экспериментальных данных 1989–2010 гг. было получено, что связь потока электронов с  $V_{sw}$  гораздо сложнее, чем предполагалась ранее. Вместо примерно линейной корреляции между  $V_{sw}$  и логарифмом потока электронов авторы показывают распределение в форме треугольника, в котором средние потоки электронов с энергией 1.8–

3.5 МэВ с усреднением за 1 сутки имеют четко выраженный нижний предел, который линейно зависит от  $V_{sw}$ , и практически не зависящий от  $V_{sw}$  верхний предел. Хотя  $V_{sw}$  связана с потоком электронов сложным образом, она все же является ключевым параметром для прогнозирования уровня потока электронов.

Сложность физических процессов во взаимодействии солнечного ветра с магнитосферой, в результате чего происходит ускорение электронов и пополнение ими радиационных поясов, ведет к многофакторности зависимости потоков релятивистских электронов от состояния межпланетной среды и магнитосферы. Потоки высокоэнергичных электронов изменяются при взаимодействии магнитосферы с высокоскоростными потоками солнечного ветра, в результате чего происходят магнитные бури [7–11]. Однако далеко не все магнитные бури приводят к увеличению потока электронов во внешнем радиационном поясе. Часто во время магнитных бурь и после них проис-



**Рис. 1.** Связь суточного флюенса высокоэнергичных (>2 МэВ) электронов  $F(0)$  с флюенсом в предыдущий день  $F(-1)$ . Прямая соответствует линейной регрессии (а). Связь флюенса электронов с флюенсом в предыдущий день в случае степенного представления (б).

ходит уменьшение потоков электронов [12]. Зависимость потока высокоэнергичных электронов от возмущения магнитосферы неоднозначна и требует дальнейшего исследования.

В настоящей работе мы остановимся только на исследовании корреляционных связей суточных флюенсов электронов с параметрами околоземного и межпланетного космического пространства с различным временем запаздывания.

### ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

В качестве характеристик поведения электронов магнитосферного происхождения на геостационарных орбитах был выбран суточный флюенс (суммарный поток за сутки) релятивистских магнитосферных электронов с энергиями более 2 МэВ. Информация о высокоэнергичных электронах, характеристиках солнечной и межпланетной активности собрана в базе данных SGA (Solar and Geomagnetic Activity), созданной и поддерживаемой в ИЗМИРАН. Эта база данных содержит информацию о суточных флюенсах электронов, измеряемых на космических аппаратах серии GOES (<ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/lists/particle/>) за 36-летний период (1986–2021 гг.), информацию о параметрах солнечного ветра из базы данных OMNI [[ftp://spdf.gsfc.nasa.gov/pub/data/omni/high\\_res\\_omni](ftp://spdf.gsfc.nasa.gov/pub/data/omni/high_res_omni)], информацию о геомагнитной активности –  $K_p$  [<ftp://ftp.gfz-potsdam.de/pub/home/obs/kp-ap/wdc>],  $Dst$  [<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>] и  $A_p$ -индексы [<ftp://ftp.gfz-potsdam.de/pub/home/obs/kp-ap/wdc>]. База данных SGA обновляется в ежедневном режиме.

### СВЯЗЬ ИЗМЕНЕНИЙ СУТОЧНОГО ФЛЮЕНСА ЭЛЕКТРОНОВ С МЕЖПЛАНЕТНЫМИ И ГЕОМАГНИТНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Чтобы изучить связь изменений суточного электронного флюенса с межпланетными и геофизическими характеристиками, мы использовали различные среднесуточные параметры за период наблюдений высокоэнергичных (>2 МэВ) электронов на спутниках GOES (июнь 1987–2021 гг.).

#### Связь флюенса электронов со значениями флюенса за предыдущие дни

В поведении флюенса высокоэнергичных (>2 МэВ) электронов случаются резкие изменения ото дня ко дню, но в целом видна его значительная инерционность. Это предполагает значимую статистическую связь текущего значения  $F(0)$  со значениями флюенса, наблюдавшимися в предыдущие дни  $F(-1)$ ,  $F(-2)$ .

Из рис. 1 следует, что связь флюенсов  $F(0)$  и  $F(-1)$  за соседние дни достаточно тесная (коэффициент корреляции  $K_F = 0.79$ , рис. 1а). Если сравнивать флюенс  $F(0)$  с  $F(-2)$ , то связь становится слабее (коэффициент корреляции  $K_F = 0.55$ ), но остается достаточно явной. Наибольший коэффициент корреляции можно видеть в случае степенного представления (рис. 1б). В этом случае коэффициент корреляции  $K_F = 0.86$ .

Положительная корреляция (коэффициент корреляции 0.79) также существует между  $F(0)$  и  $F_R$  – средним суточным флюенсом электронов за последний солнечный оборот (последние 27 дней).

Кроме инерционности в поведении флюенса электронов наблюдается и очевидная квазидвадцатисемидневная повторяемость. Поэтому существует корреляция между сегодняшним флюенсом и флюенсом, измеренным 27 дней назад. Учитывая, сдвиги солнечных структур (в первую очередь, корональных дыр), вращающихся вместе с Солнцем, лучше усреднять флюенс за 26–28 дни от сегодняшнего. Полученный таким образом индекс  $F_{27}$  коррелирует с  $F(0)$  с коэффициентом 0.39. Напомним, что коэффициент корреляции суточного флюенса электронов с флюенсом в предыдущий день равен 0.79, что говорит, в целом, об инерционности потока высокоэнергичных электронов.

Таким образом, все обсуждавшиеся индексы, связанные с предысторией динамики электронного флюенса, а именно  $F(-1)$ ,  $F(-2)$ ,  $F_R$ ,  $F_{27}$ , положительно коррелируют с текущим значением суточного флюенса и могут быть полезны для прогностических моделей.

*Связь с индексами геомагнитной активности*

Во время геомагнитных возмущений высокоэнергичные электроны ведут себя сложным образом, и их поток может изменяться на несколько порядков, как вверх, так и вниз [13, 14]. Поэтому трудно ожидать тесной связи электронного флюенса с геомагнитными индексами. Действительно, коэффициент корреляции между флюенсом  $F(0)$  и  $Ap$ -индексом геомагнитной активности в тот же день  $Ap(0)$  около нуля  $K_{Ap} = 0.03$ . Но корреляция возрастает, если использовать  $Ap$ -индексы предыдущих дней. Коэффициент корреляции между флюенсом  $F(0)$  и  $Ap(-1)$   $K_{Ap} = 0.17$ . Если сдвинуться еще на день или два раньше, то коэффициент корреляции между флюенсом  $F(0)$  и  $Ap(-2)$  становится  $K_{Ap} = 0.3$ , а между флюенсом  $F(0)$  и  $Ap(-3)$   $K_{Ap} = 0.32$ . Такая корреляция уже должна быть полезна для прогнозирования электронного флюенса. При сдвиге еще на день корреляция несколько уменьшается и коэффициент корреляции между флюенсом  $F(0)$  и  $Ap(-4)$   $K_{Ap} = 0.29$ .

Еще лучшие результаты дает нелинейная корреляция степенной функцией. В этом случае коэффициент корреляции между логарифмом  $Ap$  в (-3) день и логарифмом электронного флюенса равен 0.43 (рис. 2). Максимальный коэффициент

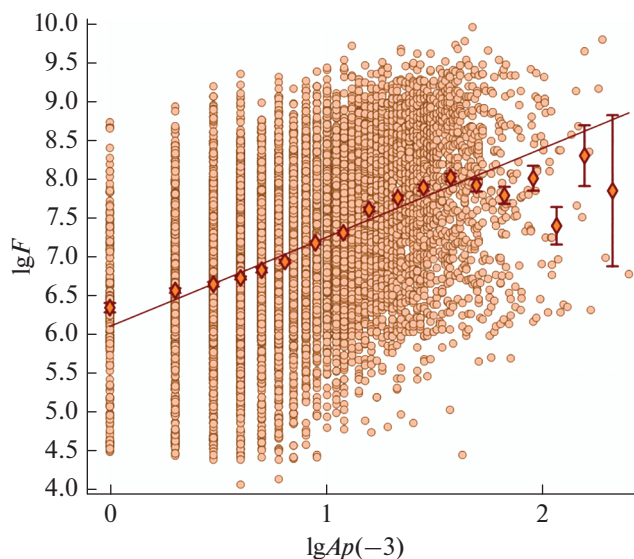


Рис. 2. Связь электронного флюенса и  $Ap$ -индекса геомагнитной активности в -день “-3”.

корреляции наблюдается с  $Ap$ -индексом, измеренным на 3 дня ранее.

*Связь со скоростью солнечного ветра*

Из всех характеристик межпланетной среды наиболее тесная связь флюенса высокоэнергичных магнитосферных электронов обнаружена со скоростью солнечного ветра.

Мы рассчитали характеристики линейной регрессии для связи электронного флюенса со скоростью солнечного ветра со сдвигом: от 0 до 3 дней. Соответствующие коэффициенты корреляции приведены в табл. 1 вместе с ранее обсуждавшимися результатами. При всех сдвигах имеется значимая корреляция, и она максимальна для скорости солнечного ветра при сдвиге на 2 дня.

Еще лучшие результаты дает нелинейная корреляция степенной функцией (рис. 3). В этом случае коэффициент корреляции между логарифмом  $V_{sw}$  в (-2) день и логарифмом флюенса равен 0.60. Поскольку  $V_{sw}$  меняется в сравнительно узких пределах, а флюенс меняется на несколько порядков, зависимость получается очень сильная:  $F \propto V^{6.51 \pm 0.08}$ .

Таблица 1. Коэффициенты корреляции между суточным флюенсом электронов и различными параметрами

Параметр	0 день	-1 день	-2 день	-3 день	-4 день
Флюенс электронов	—	0.79	0.55	—	—
$Ap$ -индекс	0.03	0.17	0.30	0.32	0.29
Скорость СВ	0.24	0.37	0.43	0.38	—

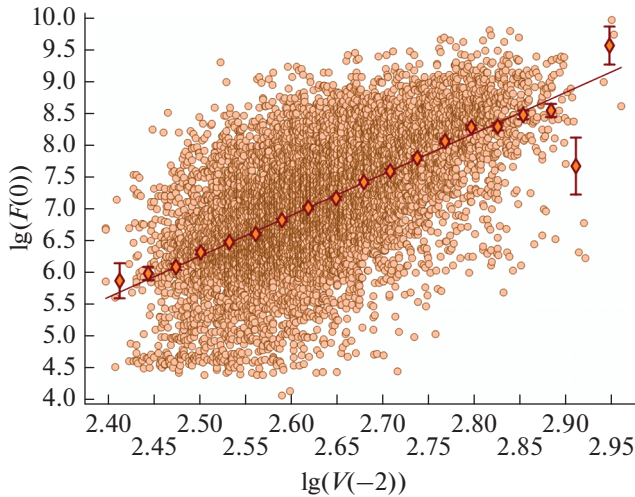


Рис. 3. Связь суточного электронного флюенса и скорости солнечного ветра со сдвигом на 2 дня в случае степенного представления.

Тесная корреляция флюенса потока электронов с флюенсом в предыдущий день ожидаема и определяется высокой инерционностью наблюдений потоков электронов. После спокойного дня с низкими значениями потока электронов почти всегда следует похожий спокойный день, а электронные возмущения длятся достаточно долго, поэтому вероятность высокого флюенса в следующий день достаточно велика. Корреляция со скоростью солнечного ветра и  $Ap$ -индексом может показаться низкой и недостаточно убедительной, но из-за длительного периода исследования ошибка коэффициентов корреляции мала, и не приходится сомневаться в прогностической значимости этих параметров.

На основе проведенного анализа был сделан вывод, что для создания эффективной прогностической модели флюенса высокоэнергичных магнитосферных электронов целесообразно комбинировать индексы, связанные с предысторией флюенса, с индексами, включающими скорость солнечного ветра и уровень геомагнитной активности.

Именно комбинирование таких индексов полезно для создания многопараметрической модели суточного флюенса высокоэнергичных магнитосферных электронов по формуле (1), в которой

$$F_M = a + bF + cV + dAp. \quad (1)$$

Моделирование суточного флюенса высокоэнергичных ( $>2$  МэВ) магнитосферных электронов с помощью трех различных индексов дало наилучшие результаты (коэффициент корреляции  $K_N = 0.82$ ) при использовании флюенса за предыдущий день  $F(-1)$ , скорости солнечного ветра за предыдущий день  $V(-1)$  и  $Ap$ -индекса

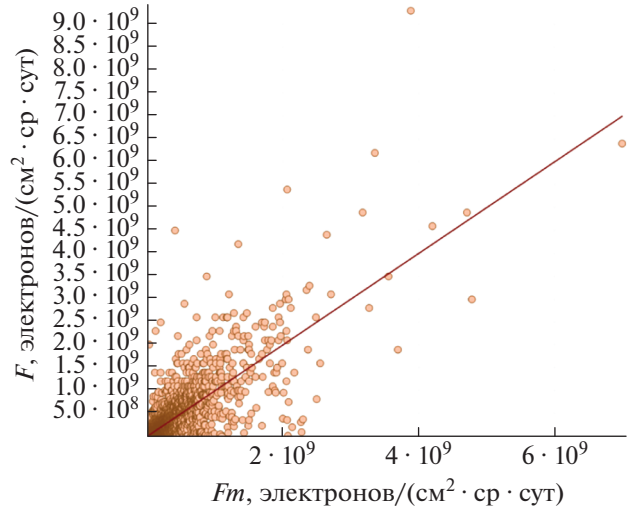


Рис. 4. Связь измеренного суточного флюенса высокоэнергичных ( $>2$  МэВ) электронов с флюенсом, рассчитанным по трехпараметрической модели. Прямая соответствует линейной регрессии.

геомагнитной активности на 2 дня ранее  $Ap(-2)$  (рис. 4).

Вместе со статистическими погрешностями регрессионных коэффициентов для выбранных параметров, имеем:

$$F_M = (-1.29 \pm 0.11) \cdot 10^8 + \\ + (0.882 \pm 0.010) F(-1) + \\ + (1.62 \pm 0.21) \cdot 10^6 V(-1) + \\ + (3.65 \pm 0.38) \cdot 10^5 Ap(-2).$$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассчитанные коэффициенты корреляции между флюенсом высокоэнергичных магнитосферных электронов с энергией  $>2$  МэВ, скоростью солнечного ветра и  $Ap$ -индексом геомагнитной активности за период (1988–2021 гг.) показали, что флюенс высокоэнергичных магнитосферных электронов практически не связан с уровнем геомагнитной активности в тот же день, но коррелирует с  $Ap$ -индексом геомагнитной активности, наблюдавшимся на 2–4 дня ранее с коэффициентами корреляции 0.30, 0.32 и 0.29 соответственно. Корреляция между логарифмом флюенса электронов и логарифмом  $Ap$ -индекса возрастает до 0.44. Флюенс электронов достаточно тесно связан со скоростью солнечного ветра, особенно со скоростью, измеренной на 2 дня ранее, с коэффициентом корреляции 0.43. Корреляция между логарифмом флюенса электронов и логарифмом скорости солнечного ветра составляет 0.60, что говорит о сильной связи между флюенсом электронов и скоростью солнечного ветра, так как скорость

солнечного ветра меняется в довольно узких пределах, а флюенс электронов меняется на несколько порядков.

На основе полученных зависимостей между флюенсом высокоэнергичных электронов и параметрами околоземной и межпланетной среды нами разработана трехпараметрическая модель, позволяющая прогнозировать суточный флюенс высокоэнергичных магнитосферных электронов, основанная на предыстории поведения флюенса, данных об *Ap*-индексе геомагнитной активности и измерениях скорости солнечного ветра. Модель показывает хорошее согласие с экспериментальными данными с коэффициентом корреляции 0.82 для всего периода 1987–2021 гг.

Работа выполнена при поддержке Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (грант № AP08855916) и Аэрокосмического комитета Министерства цифрового развития, инноваций и аэрокосмической промышленности Республики Казахстан (программа BR11265408).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Paulikas G.A., Blake J.B. // Geophys. Monogr. Ser. AGU. 1979. V. 21. P. 180.
2. Blake J.B., Baker D.N., Turner N. et al. // Geophys. Res. Lett. 1997. V. 24. No. 8. P. 927.
3. Li X., Temerin M., Baker D.N. et al. // Geophys. Res. Lett. 2001. V. 28. No. 9. P. 1887.
4. Li X., D. N. Baker, M. Temerin et al. // Space Weather. Int. J. Res. Appl. 2005. V. 3. Art. No. S04001.
5. Lyons L.R., Lee D.-Y., Thorne R.M. et al. // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. Art. No. A11202.
6. Reeves G.D., Morley S.K., Friedel R.H.W. et al. // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. Art. No. A02213.
7. Reeves G.D., Morley S.K., Cunningham G. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2013. V. 118. P. 1040.
8. Mathie R.A., Mann I.R. // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. Art. No. 29783.
9. Miyoshi Y., Kataoka R. // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32. Art. No. L21105.
10. Miyoshi Y., Kataoka R. // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. Art. No. A03S09.
11. Reeves G.D. // Geophys. Res. Lett. 1998. V. 25. No. 11. P. 1817.
12. Reeves G.D., McAdams K.L., Friedel R.H.W., O'Brien T.R. // Geophys. Res. Lett. 2003. V. 30. No. 10. P. 1529.
13. Simms L.E., Pilipenko V.A., Engebretson M.J. et al. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2014. V. 119. No. 9. P. 7297.
14. O'Brien T.P., McPherron R.L., Sornette D. et al. // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. No. A8. Art. No. 15533.

### Statistical relationship of the fluence of magnetospheric electrons with the energy more than 2 MeV with geomagnetic and interplanetary characteristics in 1987–2021

O. N. Kryakunova<sup>a, b, \*</sup>, A. V. Belov<sup>c</sup>, A. F. Yakovets<sup>a</sup>, A. A. Abunin<sup>c</sup>, I. L. Tsepakina<sup>a</sup>, B. B. Seifullina<sup>a</sup>, M. A. Abunina<sup>c</sup>, N. F. Nikolaevsky<sup>a</sup>, N. S. Shlyk<sup>c</sup>

<sup>a</sup> SLLP “Institute of Ionosphere”, Almaty, 050020 Kazakhstan

<sup>b</sup> Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia

<sup>c</sup> Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 108840 Russia

\*e-mail: krolganik@yandex.ru

Using dataset for 35 years (1987–2021) of measurements of >2 MeV magnetospheric electron fluxes in geostationary orbits, solar wind velocity, and geomagnetic activity, we calculated the correlation coefficients between the daily electron fluence, solar wind velocity, and the *Ap*-index of geomagnetic activity with different delay time, as well as between electron fluxes calculated on successive days. Based on the history data of fluence behavior, on data of the *Ap*-index of geomagnetic activity, and measurements of the solar wind speed, the three-parameter model was developed to predict the fluence of high-energy magnetospheric electrons for the next day. The model shows good agreement with experimental data with a high correlation coefficient (0.82) for the entire period 1987–2021.