

УДК523.165

О.Н. Крякунова<sup>1</sup>, А.В. Белов<sup>2</sup><sup>1</sup>ДТОО «Институт ионосферы», Алматы, Казахстан<sup>2</sup>ФГБУН «Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук» (ИЗМИРАН), Москва, Троицк, РоссияE-mail: [krolganik@yandex.ru](mailto:krolganik@yandex.ru)**О СВЯЗИ ФЛЮЕНСА ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫХ МАГНИТОСФЕРНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ С ПАРАМЕТРАМИ МЕЖПЛАНЕТНОЙ СРЕДЫ**

**Аннотация.** В работе рассмотрены события возрастаний флюенса высокоэнергичных магнитосферных электронов на геостационарных орбитах в 1987–2007 гг. В качестве основной характеристики поведения электронов с энергией  $>2$  МэВ, измеренных спутниками GOES, был выбран суточный флюенс, поскольку именно он тесно связан с неполадками спутниковой электроники. Показано, что возрастания высокоэнергичных магнитосферных электронов связаны со значительными межпланетными и магнитосферными возмущениями, но отстают от них на 1–3 дня. Самое длительное событие 10–31 декабря 2006 г. продолжалось 22 дня, во время которых электроны превышали сверхопасный уровень, наибольший суммарный флюенс относится к событию 28 июля – 5 августа 2004 г. и составляет  $2.6 \cdot 10^{10}$  электронов/(см<sup>2</sup> стер). Флюенс высокоэнергичных магнитосферных электронов оказался достаточно тесно связан со скоростью солнечного ветра, особенно со скоростью, измеренной на 2 дня ранее и с Ap-индексом геомагнитной активности с запаздыванием на 2–3 дня. Запаздывание электронного флюенса на 2–3 дня относительно межпланетных и геомагнитных индексов создаёт возможность достаточно надёжных прогнозов не только на ближайший день, но и на несколько дней вперёд.

**Ключевые слова:** высокоэнергичные магнитосферные электроны, суточный флюенс, межпланетные параметры.

**Введение**

Поведение высокоэнергичных электронов в магнитосфере Земли относится к наиболее актуальным проблемам физики магнитосферы и космической погоды. Это связано, в первую очередь, с тем, что большие возрастания потоков релятивистских электронов приводят к сбоям работы космических аппаратов и в ряде случаев приводили к выходу из строя спутников [1]. Аномалии, чаще всего, были связаны с ложными командами, вызванными внутренним электростатическим разрядом. Большинство аномалий происходило из-за накопления заряда внутри электронных компонентов, вызванных электронами высоких энергий  $>2$  МэВ во время, когда флюенс электронов с энергией  $>2$  МэВ превышал  $10^9$  электронов·(см<sup>2</sup>·ср·день)<sup>-1</sup> в течение двух дней [1–2]. Казахстанские спутники связи KazSat-2 и KazSat-3 находятся на геостационарной орбите, где основной вклад в нарушения работы аппаратуры вносят высокоэнергичные электроны [3–6], поэтому исследование по-

ведения высокоэнергичных электронов на геостационарной орбите в настоящее время является актуальной задачей. В то же время, высокоэнергичные магнитосферные электроны чрезвычайно опасны для низкоорбитальных спутников с большим наклоном орбиты, таких как KazEOSat [3]. В качестве основной характеристики поведения электронов с энергией  $> 2$  МэВ, измеренных спутниками GOES на геостационарных орбитах, был выбран суточный флюенс, поскольку именно он тесно связан с неполадками спутниковой электроники [3].

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, не доступна. Поэтому установить общий уровень опасности высокоэнергичных электронов

для всех геостационарных спутников очень сложно. В проекте SPACecast [<http://fp7-spacecast.eu>] опасный уровень электронов устанавливается в соответствии с прошлым опытом, когда аномалии неоднократно имели место на телекоммуникационных спутниках на геостационарной орбите. Статистический анализ показал, что аномалии были вызваны накоплением заряда внутри электронных компонентов, вызванных электронами высоких энергий  $>2$  МэВ, и что это происходило, когда флюенс электронов с энергией  $>2$  МэВ превышал  $10^9$  электронов/(см<sup>2</sup>·ср·день) в течение 2-дневного периода.

### Анализ событий повышения флюенса высокоэнергичных электронов

Задачей нашего исследования было изучить поведение высокоэнергичных магнитосферных электронов по данным спутников GOES и найти основные закономерности в поведении скорости солнечного ветра и  $A_p$ -индекса геомагнитной активности до и во время повышения флюенса электронов на геостационарной орбите.

Для исследования поведения высокоэнергичных электронов на геостационарной орбите и его связи с состоянием околоземного и межпланетного пространства создана MySQL база данных, включающая в себя значения потока высокоэнергичных электронов на геостационарной орбите с энергией  $>2$  МэВ, скорость солнечного ветра  $V_{sw}$  и его плотность, а также параметры магнитного поля (общий вектор магнитного поля  $B_t$  и вертикальную составляющую напряженности межпланетного магнитного поля  $B_z$ ) и геомагнитного поля  $A_p$ ,  $K_p$  и  $Dst$  за 2000-2007 гг.

Значения потока высокоэнергичных электронов с энергией  $>2$  МэВ были получены на геостационарных спутниках GOES, значения скорости солнечного ветра  $V_{sw}$  и параметры межпланетного магнитного поля были получены на спутнике ACE (<http://www.srl.caltech.edu/ACE>).

В 1987–2008 гг. суточный флюенс высокоэнергичных ( $>2$  МэВ) электронов  $F$ , измеряемый на спутниках GOES, изменялся в широких пределах от  $1,4 \cdot 10^4$  до  $9,3 \cdot 10^9$  электронов·(см<sup>2</sup>·ср·день)<sup>-1</sup>. Поведение флюенса

электронов в 2000-2008 гг. приведено на рисунке 1.

По количеству и мощности электронных возрастных выделяется период 2003-2007 гг., когда общий уровень высокоэнергичных магнитосферных электронов существенно возрос.

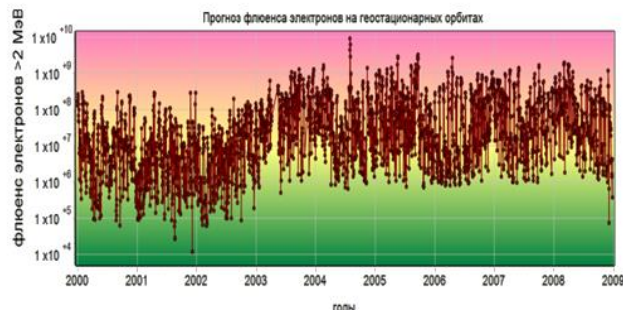


Рисунок 1 – Поведение суточного флюенса высокоэнергичных ( $>2$  МэВ) электронов в 2000-2008 гг.

Известно, что в 2000-2007 гг. солнечная активность 23 цикла изменялась от максимума до минимума, а период повышения уровня электронов в 2003-2007 гг. соответствует фазе спада и фазе минимума солнечной активности. В эти периоды существенно возрастает количество корональных дыр, являющихся источником высокоскоростного солнечного ветра [7], а высокоскоростной солнечный ветер приводит к повышению уровня магнитосферных высокоэнергичных электронов [8].

В данной работе мы считали, что электронное возрастание начинается, когда суточный флюенс превосходит  $10^8$  электронов·(см<sup>2</sup>·ср·день)<sup>-1</sup>. Обычно именно с этого уровня возрастания рассматриваются как опасные.

По измерениям серии спутников GOES был составлен каталог электронных возрастных за 21 год (1987–2007 гг.). В каталог вошли 379 событий с флюенсом  $F > 10^8$  электронов·(см<sup>2</sup>·ср·день)<sup>-1</sup>. Максимальный для этих 21 года флюенс  $9,3 \cdot 10^9$  электронов·(см<sup>2</sup>·ср·день)<sup>-1</sup> отмечен 29 июля 2004 г.

Рассмотрим примеры возрастных электронов на геостационарных орбитах совместно с параметрами межпланетной среды.

На рисунках 2 и 3 представлены примеры электронных возрастных вместе с параметрами межпланетной среды.

В событии 28 декабря 1999 г. – 5 января 2000 г. возрастание потока высокоэнергичных электронов наблюдается после межпланетного возмущения, во время которого скорость солнечного ветра возросла до 800 км/с. Это возмущение привело к малой магнитной буре 28-29 января 2000 г. Опасное возрастание электронов на геостационарной орбите наблюдается с запаздыванием около 2 дней после прихода ударной волны в околоземное космическое пространство и скачка в скорости солнечного ветра.

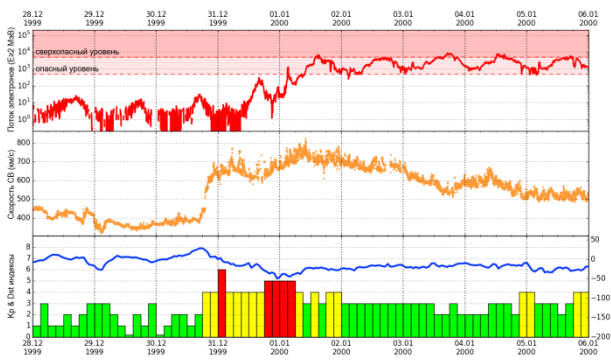


Рисунок 2 – Опасное повышение уровня электронов 28 декабря 1999 г. – 5 января 2000 г. и обстановка в околоземном космическом пространстве

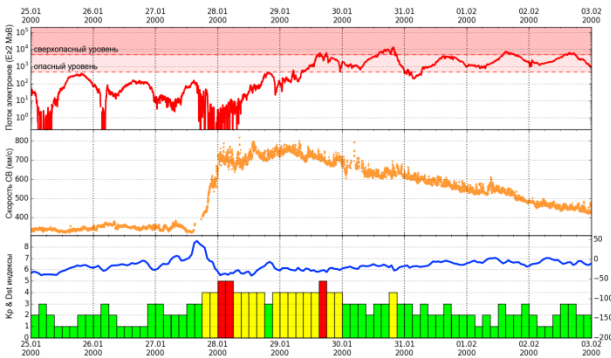


Рисунок 3 – Опасное повышение уровня электронов 21 января – 2 февраля 2000 г. и обстановка в околоземном космическом пространстве

В событии 21 января – 2 февраля 2000 г. возрастание потока высокоэнергичных электронов также наблюдается после межпланетного возмущения, во время которого скорость солнечного ветра возросла до 750 км/с. Это возмущение привело к магнитной буре 31 декабря 1999 г. – 1 января 2000 г. Нужно отметить, что опасное возрастание электронов на геостационарной орбите

наблюдается через 2 дня после прихода ударной волны в околоземное космическое пространство и скачка в скорости солнечного ветра.

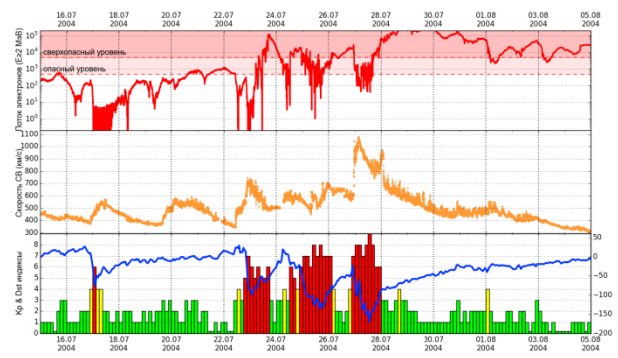


Рисунок 4 – Экстремальное повышение уровня электронов 23 июля-1 августа 2004 г. и обстановка в околоземном космическом пространстве перед и после события

Во время этого экстремального повышения уровня высокоэнергичных электронов Ар-индекс геомагнитной активности достигал значений 300 во время очень большой магнитной бури.

В 2000-2007 гг. было 64 события продолжительностью 5 дней и больше. Длительность 6 событий оказалась 10 дней и больше. Самое длительное событие 10-31 декабря 2006 г. продолжалось 22 дня (рисунок 5), во время которых электроны превышали сверхопасный уровень.

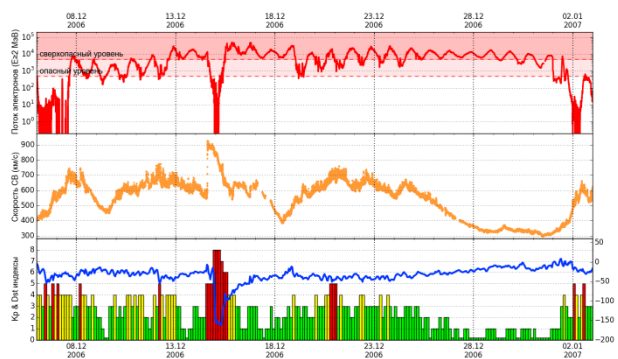


Рисунок 5 – Поток электронов и обстановка в околоземном космическом пространстве 6 декабря 2006 г. – 2 января 2007 г.

Возможно, не менее важной характеристикой электронного возрастания (наряду с максимальным суточным флюенсом) является суммарный флюенс S за всё время возрастания. В нашем каталоге наибольший

суммарный флюенс относится к событию 28 июля – 5 августа 2004 г. и составляет  $2.6 \cdot 10^{10}$  электронов/(см<sup>2</sup> стер), причем это событие является самым большим по максимальному флюенсу за весь рассмотренный период 1987-2007 гг. (рисунок 6).

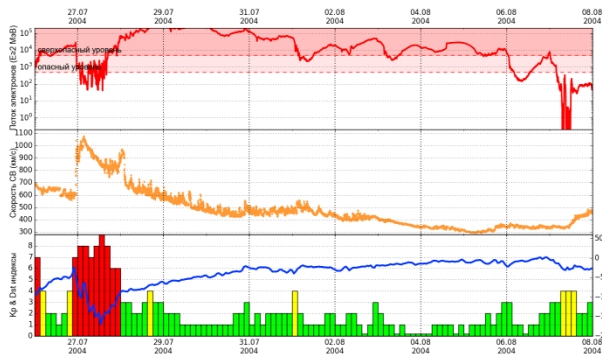


Рисунок 6 – Событие 26 июля – 7 августа 2004 г. с экстремальным суммарным флюенсом высокоэнергичных электронов

Чтобы изучить связь изменений электронного флюенса с солнечными, межпланетными и геофизическими характеристиками в 2000-2007 гг. мы использовали различные среднесуточные параметры солнечной и межпланетной активности, а также наблюдения высокоэнергичных (>2 МэВ) электронов на спутниках GOES.

Предварительный анализ показал, что солнечные индексы слабо связаны с поведением потока и флюенса электронов. Наиболее перспективными оказались межпланетные характеристики и индексы геомагнитной активности (наряду с предисторией самого электронного флюенса).

### Связь с межпланетными параметрами

Из всех характеристик межпланетной среды наиболее тесная связь с высокоэнергичными магнитосферными электронами обнаружена со скоростью солнечного ветра.

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

Таблица 1. Коэффициенты корреляции между флюенсом электронов и различными параметрами

Параметр	0 день	-1 день	-2 день	-3 день	-4 день
Флюенс электронов	1	0.79	0.56	-	-
Ар-индекс	0.03	0.17	0.29	0.31	0.28
Скорость СВ	0.23	0.36	0.41	0.37	-

Ещё лучшие результаты даёт нелинейная корреляция степенной функцией (рис. 7). В этом случае коэффициент корреляции между логарифмом скорости солнечного ветра в -2 день (позавчера) и логарифмом электронного флюенса 0.60. Поскольку скорость солнечного ветра меняется в сравнительно узких пределах, а электронный флюенс меняется на несколько порядков, зависимость получается очень сильная:  $F \approx V^{6.47 \pm 0.09}$ .

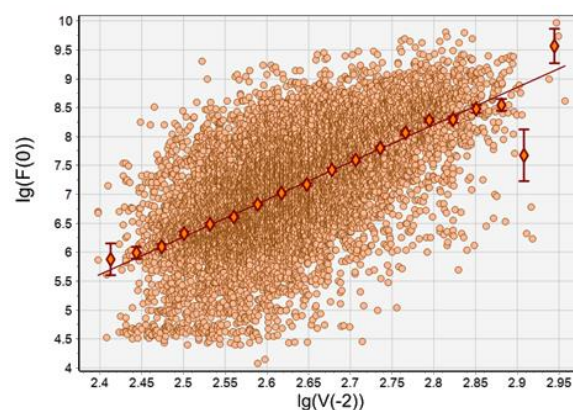


Рисунок 7 – Связь электронного флюенса и скорости солнечного ветра со сдвигом на 2 дня

### Заключение

Возрастания высокоэнергичных магнитосферных электронов связаны со значительными межпланетными и магнитосферными возмущениями, но отстают от них на 1–3 дня. Флюенс высокоэнергичных магнитосферных электронов оказался достаточно тесно связан со скоростью солнечного ветра, особенно со скоростью, измеренной на 2 дня ранее и с Ар-индексом геомагнитной активности с запаздыванием на 2-3 дня. Запаздывание электронного флюенса на 2-3 дня относительно межпланетных и геомагнитных

индексов создаёт возможность достаточно надёжных прогнозов не только на ближайший день, но и на несколько дней вперёд.

Работа выполнена в рамках программно-целевого финансирования Аэрокосмиче-

ского комитета Министерства оборонной и аэрокосмической промышленности Республики Казахстан на 2015-2017 гг. по программе НТП-О.0674, проект №0115PK01275.

### Список литературы

- 1 Wrenn G.L., Rodgers D.J., Ryden K.A. A solar cycle of spacecraft anomalies due to internal charging // *Ann Geophys.* 2002. V.20. P.953-956.
- 2 Wrenn G.L. Chronology of killer electrons: Solar cycles 22 and 23 // *J. Atmos. and Sol. Terr. Phys.* 2008. V.71. P.1210-1218.
- 3 Belov A., Dorman L., Iucci N., Kryakunova O., Ptitsyna N. The relation of high- and low-orbit satellite anomalies to different geophysical parameters. // in "Effects of Space Weather on Technology Infrastructure" edited by I.A. Daglis, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, NATO Science Series II.-2004.- Vol.176.- P. 147-163.
- 4 Daly E.J. Outlook on Space Weather Effects on Spacecraft. // *Effects of Space Weather on Technology Infrastructure*, edited by I.A. Daglis // Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, NATO Science Series II.-2004.- Vol.176.- P. 91-108.
- 5 Barth J.I. Precention of Spacecraft Anomalies – The Role of Space Climate and Space Wather Model. // *Effects of Space Weather on Technology Infrastructure*, edited by I.A. Daglis //

- Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, NATO Science Series II.-2004.- Vol.176.-P. 123-146.
- 6 Horne R.B., Glauert S.A., Meredith N.P., Koskinen H., Vainio R., Afanasiev A., Ganushkina N.Y., Amariutei O.A., Boscher D., Sicard A., Maget V., Poedts S., Jacobs C., Sanahuja B., Aran A., Heynderickx D., Pitchford D. Forecasting the Earth's radiation belts and modelling solar energetic particle events: Recent results from SPACECAST // *Journal of Space Weather and Space Climate.* –2013.– Vol.3.– P.A20-34.
  - 7 Kryakunova O., Belov A., Abunin A., Abunina M., Eroshenko E., Malimbayev A., Thepakina I., Yanke V. Recurrent and sporadic Forbush-effects in deep solar minimum // *Journal of Physics: Conference Series (JPCS).* 632.– 2015.– 012062 doi:10.1088/1742-6596/632/1/012062.
  - 8 Li X., Temerin M., Baker D.N., Reeves G.D. Behavior of MeV electrons at geosynchronous orbit during last two solar cycles // *J. Geophys. Res.* V.116. NA11207. 2011.– doi:10.1029/2011JA016934.

*Принято в печать 06.02.2017*

**О.Н. Крякунова<sup>1</sup>, А.В. Белов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>ДТОО «Институт ионосферы», Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>ФГБУН «Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук» (ИЗМИРАН), Москва, Троицк, Россия

E-mail: [krolganik@yandex.ru](mailto:krolganik@yandex.ru)

### **О СВЯЗИ ФЛЮЕНСА ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫХ МАГНИТОСФЕРНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ С ПАРАМЕТРАМИ МЕЖПЛАНЕТНОЙ СРЕДЫ**

**Аннотация.** В работе рассмотрены события возрастаний флюенса высокоэнергичных магнитосферных электронов на геостационарных орбитах в 1987–2007 гг. В качестве основной характеристики поведения электронов с энергией >2 МэВ, измеренных спутниками GOES, был выбран суточный флюенс, поскольку именно он тесно связан с неполадками спутниковой электроники. Показано, что возрастания высокоэнергичных магнитосферных электронов связаны со значительными межпланетными и магнитосферными возмущениями, но отстают от них на 1–3 дня. Самое длительное событие 10-31 декабря 2006 г. продолжалось 22 дня, во время которых электроны превышали сверхопасный уровень, наибольший

суммарный флюенс относится к событию 28 июля – 5 августа 2004 г. и составляет  $2.6 \cdot 10^{10}$  электронов/(см<sup>2</sup> стер). Флюенс высокоэнергичных магнитосферных электронов оказался достаточно тесно связан со скоростью солнечного ветра, особенно со скоростью, измеренной на 2 дня ранее и с Ар-индексом геомагнитной активности с запаздыванием на 2-3 дня. Запаздывание электронного флюенса на 2-3 дня относительно межпланетных и геомагнитных индексов создаёт возможность достаточно надёжных прогнозов не только на ближайший день, но и на несколько дней вперёд.

**Ключевые слова:** высокоэнергичные магнитосферные электроны, суточный флюенс, межпланетные параметры.

**О.Н. Крякунова<sup>1</sup>, А.В. Белов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>«Ионосфера институты» ЕЖШС, Алматы, Қазақстан

<sup>2</sup>ФМБГМ «Н.В. Пушкин атындағы Ресей ғылым академиясы жер магнетизм, ионосфера және радио толқындар институты», Мәскеу, Троицк, Ресей;

E-mail: [krolganik@yandex.ru](mailto:krolganik@yandex.ru)

### **ПЛАНЕТААРАЛЫҚ ОРТАДАҒЫ ПАРАМЕТРЛАРМЕН МАГНИТОСФЕРАЛЫҚ ЭЛЕКТРОНДАРДЫҢ ЖОҒАРЫ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ФЛЮЕНСІНІҢ БАЙЛАНЫСЫ ТУРАЛЫ**

**Аннотация:** 1987-2007 жж геостационарлық орбитадағы жоғары энергиялы магнитосфералық электрондардың флюенстік өсу оқиғалары қарастырылды. >2 МэВ электрондардың қуаты табиғатымен сипатталатын негіздегі GOES жер серіктері өлшеулерінен жер серіктік электроникалардың ақауларымен тығыз байланысты болатын тәуліктік флюенс таңдап алынды. Жоғары энергиялы магнитосфералық электрондардың өсуі планетааралық және магнитосфералық ауытқулармен байланысты, бірақ олар 1-3 күнге артта қалып отыр. Ең ұзақ оқиға 2006 ж. 10-31 желтоқсанда болды, ол 22 күнге созылды, жоғары қауіпті деңгейден асқан электрондардың флюенс жиынтығына 2004 жылғы 28 шілде – 5 тамыздағы оқиға жатады, ол  $22.6 \cdot 10^{10}$  электрондар/(см<sup>2</sup> стер) құрайды. Жоғары энергиялы магнитосфералық электрондар флюенсі күн желінің жылдамдығымен әсіресе 2 күн бұрын жылдамдықпен және 2-3 күнге кешігетін геомагниттік белсенділіктің Ар-индексімен тығыз байланыста болып шықты. Планетааралық және геомагниттік индекстерге қатысты электрондық флюенстің 2-3 күнге кешігуі жақын күндерге берілетін сондай-ақ бірнеше күн алдын-ала берілетін нақты сенімді болжаулар алуға мүмкіндік береді.

**Түйін сөздер:** жоғары энергиялы магнитосфералық электрондар, тәуліктік флюенс, планетааралық параметрлер.

**O.N.Kryakunova<sup>1</sup>, A.V.Belov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Institute of Ionosphere, Almaty, Kazakhstan

<sup>2</sup>Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation (IZMIRAN), Moscow, Troitsk, Russia

E-mail: [krolganik@yandex.ru](mailto:krolganik@yandex.ru)

## **ON THE CONNECTION OF THE FLUENCE OF HIGH-ENERGY MAGNETOSPHERIC ELECTRONS WITH PARAMETERS OF THE INTERPLANETARY MEDIUM**

**Abstract:** The events of high-energy magnetospheric electrons fluence enhancements at geostationary orbits in 1987-2007 are considered. The daily fluence of electrons was selected as the main characteristic of the behavior of electrons with energy  $> 2$  MeV measured by GOES satellites at geostationary orbit, since it is closely related to malfunctions of satellite electronics. It is shown that the increases of high-energy magnetospheric electrons begin during major interplanetary and magnetospheric disturbances, but the beginning of the electron increases lags behind them for 1–3 days. The longest event on December 10-31, 2006, lasted 22 days, during which electron fluence exceeded the highly dangerous level, the largest total fluence was during the event from July 28 to August 5, 2004, and was equal to  $2.6 \cdot 10^{10}$  electrons / (cm<sup>2</sup> sr). The fluence of high-energy magnetospheric electrons is closely associated with the solar wind's speed, especially with its value measured 2 days earlier and with the *Ap* index of geomagnetic activity observed 2–3 days earlier. The delay of the electronic fluence by 2-3 days relative to the interplanetary and geomagnetic indices creates the possibility of fairly reliable forecasts not only for the next day, but also for several days ahead.

**Keywords:** high energy magnetospheric electron, daily fluence, interplanetary parameters.