

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ СВЯЗИ ПОТОКОВ ЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ
НА ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЕ С ПАРАМЕТРАМИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА
И ИНДЕКСАМИ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ В 22-м И 23-м СОЛНЕЧНЫХ ЦИКЛАХ**

¹В.И. Дегтярев, ²Г.В. Попов, ¹С.Э. Чудненко

**CORRELATION OF ENERGETIC ELECTRON FLUXES AT GEOSTATIONARY
ORBIT WITH SOLAR WIND PARAMETERS AND GEOMAGNETIC
ACTIVITY INDICES DURING SOLAR CYCLES 22 AND 23**

¹V.I. Degtyarev, ²G.V. Popov, ¹S.E. Chudnenko

Исследовалась эффективность связи потоков энергичных электронов на геостационарной орбите (ГО) с параметрами солнечного ветра (V и n) и индексами геомагнитной активности (PC , AE , K_p и D_{st}) в течение 22-го и 23-го циклов солнечной активности. Использованы данные по потокам электронов, зарегистрированным на спутниках LANL (диапазон энергии электронов от 24.1 кэВ до 2.0 МэВ) за 1996–2009 гг. и GOES ($E > 2$ МэВ) за 1986–2009 гг. Найдено, что в течение солнечного цикла эффективность связи изменялась определенным образом: связь потоков электронов различных энергий как с параметрами солнечного ветра, так и с индексами геомагнитной активности была наилучшей в минимуме солнечной активности и наихудшей – в период максимума и на начальной стадии спада солнечной активности. Анализ трехмесячных периодов в течение 23-го солнечного цикла показал, что скорость солнечного ветра является лучшим индикатором потоков релятивистских электронов примерно в 60 % всех случаев, в ~20 % всех случаев лучшим индикатором является плотность солнечного ветра и в ~20 % всех случаев – индексы геомагнитной активности. Для потоков низкоэнергичных электронов (до 100–150 кэВ) лучшая связь с индексами геомагнитной активности отмечается практически во всех случаях. Результаты обсуждаются с точки зрения условий в солнечном ветре и магнитосфере.

Ключевые слова: энергичные электроны; геостационарная орбита; солнечный ветер; геомагнитная активность; цикл солнечной активности.

We studied correlation of energetic electron fluxes at geostationary orbit (GO) with solar wind parameters (V and n) and geomagnetic activity indices (PC , AE , K_p , and D_{st}) during solar cycles 22 and 23. We used data on electron fluxes recorded by LANL satellites (electron energy range from 24.1 keV to 2.0 MeV) in 1996–2009 and GOES satellites ($E > 2$ MeV) in 1986–2009. The correlation was found to change in the following way during a solar cycle: the correlation of electron fluxes having different energies with solar wind parameters and geomagnetic activity indices was highest at solar minimum; it was lowest at solar maximum and at the initial decay phase of a solar cycle. According to the analysis of 3-month periods during solar cycle 23, the solar wind velocity is the best indicator of relativistic electron fluxes in about 60 % of cases. In about 20 % of cases, the best indicator is the solar wind density; in other 20 % of cases, these are the geomagnetic activity indices. For low-energy electron fluxes (up to 100–150 keV), the highest correlation with geomagnetic activity indices is observed in virtually all cases. The results are discussed from the viewpoint of conditions in the solar wind and in the magnetosphere.

Keywords: energetic electrons; geostationary orbit; solar wind; geomagnetic activity; solar cycle.

1. Введение

Исследование вариаций потоков энергичных электронов внешнего радиационного пояса представляет большой интерес в связи с их неблагоприятным воздействием на функционирование высокоорбитальных спутников [Wrenn, Sims, 1996; Baker et al., 1998a; Fennell et al., 2001; Iucci et al., 2005; Романова и др., 2005]. Наиболее опасными являются повышенные потоки релятивистских электронов (часто называемых «электронами-убийцами»), воздействие которых на системы спутников трудно устранить техническими методами. Для прогнозирования опасных ситуаций интенсивно разрабатываются модели динамики потоков энергичных и релятивистских электронов на геостационарной орбите (ГО) (см. [Li et al., 2001, 2009; Dmitriev, Chao, 2003; Xue, 2005; Degtyarev et al., 2009] и ссылки в них). Большинство из них основаны на статистическом анализе связи потоков электронов с характеристиками солнечного ветра (СВ) и индексами геомагнитной активности. Эти характеристики и индексы выполняют роль входных параметров моделей (ниже будем называть их индикаторами).

Из результатов многочисленных статистических исследований (см. [Baker et al., 1998b; O'Brien et al., 2001; Li, Temerin, 2001; Li et al., 2005; Degtyarev et al., 2005] и ссылки в них) следует вывод, что

всплески релятивистских электронов на ГО лучше всего коррелируют со скоростью солнечного ветра. Но как понять этот вывод? Ведь хорошо известно [Зеленый, Веселовский, 2008], что появление и развитие магнитосферных бурь (а именно они сопровождаются всплесками потоков энергичных электронов) контролируется не только скоростью солнечного ветра, но и его плотностью, а также величиной и направлением магнитного поля. В свою очередь, активность магнитосферных бурь и возмущенность магнитосферы в целом характеризуется геомагнитными индексами, но корреляция их с потоками релятивистских электронов на ГО не так высока, как со скоростью СВ. Многие работы последних лет посвящены разгадке этого феномена [Li, Temerin, 2001; Lyatsky, Khazanov, 2008a, b; Reeves et al., 2011; Kellerman, Shprits, 2012].

В работах [Дмитриев и др., 2002; Degtyarev et al., 2005] обнаружено, что хотя скорость солнечного ветра в целом является одним из лучших индикаторов потоков релятивистских электронов на ГО, однако для некоторых интервалов времени наилучшими входными параметрами оказываются индексы геомагнитной активности D_{st} и K_p [Degtyarev et al., 2005] или плотность СВ [Дмитриев и др., 2002], а скорость СВ является только вторым по значимости индикатором. При этом влияние геомагнитных индексов возрастает с умень-

шением рассматриваемого интервала времени [Degtyarev et al., 2005]. Кроме того, в работе [Попов и др., 2003] было обнаружено, что эффективность воздействия скорости СВ в сравнении с плотностью СВ и индексами геомагнитной активности зависит от энергии электронов. В статье [Lyatsky, Khazanov, 2008b] показано, что при низкой плотности солнечного ветра корреляция потоков релятивистских электронов с геомагнитными индексами лучше, чем со скоростью СВ.

Как было показано ранее [Lam, 2004; Mann et al., 2004; Потапов и др., 2012], эффективность связи потоков энергичных электронов на ГО с разными индикаторами меняется в цикле солнечной активности. Так, по результатам [Lam, 2004], в период максимума солнечной активности в 1989 г. и в течение нескольких последующих лет корреляция между потоками электронов с энергией >2 МэВ на ГО и магнитными индексами была слаба, но на спаде 22-го солнечного цикла в 1994 г. она значительно увеличилась.

Авторы [Mann et al., 2004] отметили также, что коэффициент корреляции между потоками электронов с энергией 1.8–3.5 МэВ и скоростью солнечного ветра достиг пикового значения в 1994–1995 гг. Потапов и др. [2012] нашли, что корреляция между потоками электронов с энергией >2 МэВ на ГО и скоростью СВ была наибольшей в минимуме солнечного цикла в 1996 г., а наименьшей – в период максимума солнечной активности. Очевидно, что зависимость эффективности разных индикаторов от фазы солнечного цикла связана с соответствующим изменением структуры солнечного ветра [Mann et al., 2004; Lam, 2004].

Целью настоящей работы является исследование статистических свойств связи потоков электронов широкого диапазона энергий (от ~ 24 кэВ до >2 МэВ) на ГО с параметрами солнечного ветра и индексами геомагнитной активности в течение длительного периода. В отличие от работ [Lam, 2004; Mann et al., 2004; Потапов и др., 2012], в настоящей работе анализируемый интервал времени включает два полных цикла солнечной активности (1986–2009 гг.). Будет рассмотрена относительная роль различных индикаторов на разных интервалах времени (в том числе в фазах солнечных циклов) и для электронов разных энергий.

2. Используемые данные и метод исследования

В работе использованы данные по энергичным электронам, полученные при помощи приборов спутников GOES (1986–2009 гг.) для энергии электронов >2 МэВ и спутников LANL (1996–2007 гг.) для энергетических диапазонов 50–225 и 315–1500 кэВ [http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp_public/]. Особенность базы данных по потокам высокоэнергичных электронов состоит в том, что ни для одного из спутников нет однородного непрерывного ряда данных в течение цикла солнечной активности. В процессе функционирования спутники могли перемещаться из одной точки стояния (географическая долгота спутника на экваторе) в другую. Поскольку существует зависимость величины регистрируемого потока от долготы расположения спутника [Дегтярев и др., 1985], то данные неоднородны, хотя и были получены на одном и том же спутнике в течение длительного

времени. Однако на орбите одновременно могли находиться несколько спутников в различных точках стояния, и их измерения перекрывали вышеотмеченные периоды. Для «сшивки» данных разных спутников была проведена взаимная нормировка данных по среднесуточным потокам электронов в каждом энергетическом диапазоне.

В результате все данные спутников GOES приведены к уровню потока электронов на долготу $\lambda=225^\circ$ Е; все данные спутников LANL приведены к уровню потока электронов на долготу $\lambda=322^\circ$ Е. При наличии данных нескольких спутников для какого-либо периода времени данные по потокам электронов (приведенные к одному уровню в одном диапазоне энергий) для всех спутников усреднялись. Таким образом, были получены непрерывные ряды среднесуточных потоков электронов с энергией более 2 МэВ за два цикла солнечной активности, а электронов более низких энергий за 23-й солнечный цикл. Кроме среднесуточных потоков электронов при анализе данных были использованы также часовые данные. Для получения рядов часовых данных по потокам электронов была проведена следующая процедура. К часовым данным, зарегистрированным на каждом отдельном спутнике, применялась процедура скользящего среднего по суточным периодам. Полученные ряды (приведенные к среднесуточному уровню) часовых данных «сшивались» согласно UT с использованием нормировочных коэффициентов, полученных ранее по среднесуточным данным.

В работе использована также база данных спутников LANL за 1989–2009 гг., опубликованная как дополнительный материал к статье [Reeves et al., 2011], с сайта [ftp://ftp.agu.org/apend/ja/2010/ja015735] для широкого спектра энергий электронов от 24.1 кэВ до 2.0 МэВ.

Данные по геомагнитной активности получены с сайтов [http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html] (AE , K_p , и D_{st}) и [http://www.wdcb.ru/stp/data/geomagn-ind.pc/] (PC), данные по параметрам СВ и ММП – с сайта [http://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html].

В работе использовался кросскорреляционный анализ связи логарифмов потоков энергичных электронов на геостационарной орбите с параметрами солнечного ветра и индексами геомагнитной активности:

$$J=\log(j),$$

где j – часовые или среднесуточные потоки. За величину эффективности связи (R_{ef}) принимался максимальный коэффициент корреляции кросскорреляционной функции. Другой параметр кросскорреляционной функции, использованный в работе, – время задержки (τ) между вариациями индикаторов и откликом на них потоков электронов, определяемое как время между максимумом кросскорреляционной функции и нулевой отметкой на оси времен.

3. Результаты

3.1. Изменение эффективности связи потоков электронов на ГО с параметрами СВ и индексами геомагнитной активности в цикле солнечной активности

На рис. 1 приведены результаты расчета эффективности связи (R_{ef}) потоков электронов с энергией

более 2 МэВ на ГО с параметрами солнечного ветра (скоростью и плотностью) и индексами возмущенности геомагнитного поля (PC , AE , K_p и D_{st}). Эффективность связи между потоками электронов и другими параметрами определялась с помощью кросскорреляционных функций, рассчитанных по месячным массивам часовых данных. Исследуемый период охватывал 1986–2009 гг. и включал два цикла солнечной активности. Полученные ежемесячные значения R_{ef} были сглажены с использованием метода скользящего среднего по тринадцати месячным точкам. Горизонтальной штриховой линией отмечен уровень средних значений R_{ef} за весь период.

Обратим внимание на вариации эффективности связи потока электронов с энергией более 2 МэВ со скоростью СВ. Ранее в работе [Mann et al., 2004] был рассмотрен период 1990–2001 гг., а в работе [Потапов и др., 2012] период 1996–2006 гг. Несмотря на некоторое отличие в методах анализа, использованных нами и названными авторами, для совпадающего периода 1990–2006 гг. получается такой же результат: R_{ef} минимальны в максимуме солнечного цикла в 1990 г. и в 2001–2002 гг. и максимальны на фазе спада, близкой к минимуму, в 1994–1995 гг. Этот вывод справедлив для всего рассмотренного нами временного интервала 1986–2009 гг. Например, для минимумов солнечной активности в 1986, 1996 и 2008–2009 гг. среднемесячное значение $W \sim 8$ и соответствующее среднее $R_{ef}(J, V) \sim 0.65$; для периода максимума 22-го солнечного цикла в 1989–1991 гг. $W \sim 179$ и $R_{ef}(J, V) \sim 0.33$; для максимума 23-го цикла в 2000–2001 гг. $W \sim 107$ и $R_{ef}(J, V) \sim 0.50$.

В целом связь потоков релятивистских электронов с параметрами СВ и индексами геомагнитной активности в 22-м солнечном цикле хуже, чем в 23-м, что можно связать с более сильной солнечной активностью в 22-м цикле. В среднем для каждого солнеч-

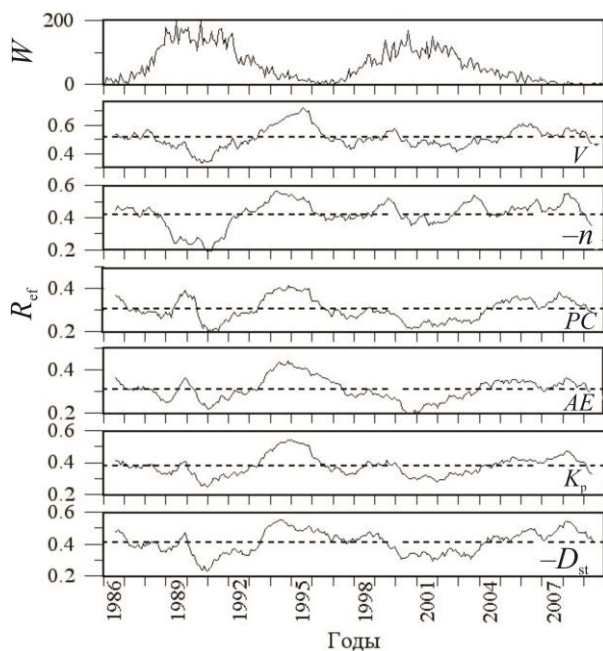


Рис. 1. Эффективность связи часовых величин потоков электронов с энергией >2 МэВ, зарегистрированных на ГО на спутниках GOES, с параметрами солнечного ветра и индексами геомагнитной активности в течение 22-го и 23-го циклов солнечной активности (1986–2009 гг.).

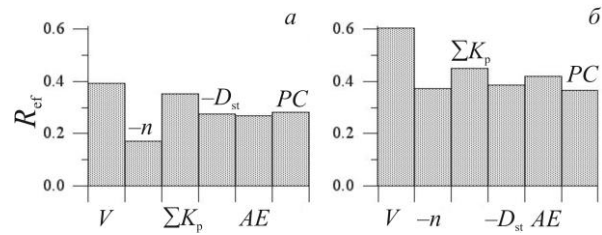


Рис. 2. Эффективность связи среднесуточных величин потоков электронов с энергией >2 МэВ на ГО с параметрами солнечного ветра, а также с геомагнитными индексами для периодов 22-го (а) и 23-го (б) циклов солнечной активности.

ного цикла наилучшая связь наблюдается между потоками релятивистских электронов и скоростью СВ (рис. 2). Как мы покажем далее, для меньших массивов используемых данных это не всегда так.

На рис. 2 показана усредненная по циклу величина эффективности связи потоков электронов с энергией более 2 МэВ на ГО с параметрами солнечного ветра и индексами геомагнитной активности, рассчитанная отдельно для каждого цикла солнечной активности. При расчетах использовались суточные данные.

Интересно рассмотреть, как изменяется эффективность связи потоков электронов на ГО с рассматриваемыми индикаторами в минимуме и максимуме солнечного цикла для разных энергий электронов. Для этого были рассчитаны коэффициенты корреляции потоков электронов с энергиями от 0.024 до 2 МэВ на ГО с параметрами СВ и индексами геомагнитной активности для трехмесячных массивов среднесуточных данных за периоды минимума (1996 г.) и максимума (2002 г.) 23-го солнечного цикла. Средние величины R_{ef} для этих периодов представлены на рис. 3.

Видно, что в зависимости от энергии (E) электронов существуют особенности R_{ef} как общие для минимума и максимума солнечного цикла, так и различающиеся.

Как в минимуме, так и в максимуме солнечной активности:

- имеется различие между R_{ef} для низко- и высокоэнергичных электронов, причем пороговая энергия близка к ~ 200 кэВ;
- для низкоэнергичных электронов влияние плотности СВ минимально, а влияние скорости меньше, чем геомагнитных индексов.

Различие между поведением R_{ef} в максимуме и минимуме солнечной активности таково:

В минимуме солнечной активности:

- общее различие между R_{ef} для низкоэнергичных и высокоэнергичных электронов не так велико, как в максимуме;
- для низкоэнергичных электронов влияние плотности СВ значительно меньше влияния остальных индикаторов;
- для высокоэнергичных электронов преобладает влияние V и D_{st} , и у всех индикаторов зависимость от E незначительна.

В максимуме солнечной активности:

- зависимость от E сильная для всех энергий электронов;
- для низкоэнергичных электронов влияние скорости и особенно плотности СВ значительно меньше влияния геомагнитных индексов;

• для высокоэнергичных электронов ситуация обратная – доминирует влияние V и n , сильно превосходя влияние геомагнитных параметров.

3.2. Лучшие индикаторы потоков энергичных электронов на геостационарной орбите

В предыдущем разделе, казалось бы, были подтверждены результаты [Baker et al., 1998b; O'Brien et al., 2001; Li, Temerin, 2001; Li et al., 2005] и многих других работ: потоки релятивистских электронов на ГО хорошо коррелируют со скоростью СВ, но показывают более слабую корреляцию с индексами геомагнитной активности. Вместе с тем уже рис. 3, а заставляет задуматься о незыблемости этого вывода, поскольку на нем геомагнитный индикатор D_{st} успешно конкурирует со скоростью СВ. Напомним, что результаты, приведенные на рис. 3, были получены при обработке трехмесячных (а не годовых) массивов данных. Выше (см. введение) отмечалось, что эффективность связи потоков энергичных электронов на геостационарной орбите с индексами геомагнитной активности для некоторых периодов может быть сравнима или превышать эффективность связи потоков со скоростью СВ.

В данном разделе мы более подробно рассмотрим эффективность связи потоков электронов различных

энергий (от 24.1 кэВ до 2 МэВ) с разными параметрами СВ и индексами геомагнитной активности и ее изменения в 23-м солнечном цикле.

Для потоков релятивистских электронов вероятность того, что лучшим индикатором потоков будет скорость СВ, уменьшается, если анализировать все меньшие временные интервалы. Если брать во внимание только скорость СВ и индексы геомагнитной активности, то, например, для исследуемого периода с 1986 по 2009 г. и для электронов с энергией >2 МэВ кросскорреляционный анализ часовых данных показывает, что скорость СВ является лучшим индикатором в 100 % случаев для периодов 10–11 лет (см. рис. 2), при использовании годовых массивов данных в 96 % случаев, при использовании трехмесячных данных в 86 % случаев (из 96 массивов) и в 72 % случаев (из 222 массивов) при использовании месячных данных. Ниже мы покажем, что и плотность солнечного ветра необходимо принимать во внимание в качестве индикатора потоков электронов.

Для более детального рассмотрения временных вариаций эффективности связи потоков электронов всего доступного спектра энергий с параметрами СВ (V и n) и индексами магнитной возмущенности (PC , AE , K_p , D_{st}) мы использовали трехмесячные интервалы суточных данных. Для каждого трехмесячного периода и для энергии в диапазоне 0.0241–2.0 МэВ был определен наилучший индикатор потоков и составлена таблица, в столбцах которой размещено указание на лучший индикатор, а в строках – последовательность трехмесячных данных по времени. Лучшим индикатором потоков электронов считался тот параметр СВ или индекс геомагнитной активности, для которого максимальный коэффициент кросскорреляционной функции был наибольшим. На рис. 4 (нижняя часть рисунка) цифрами от 1 до 3 показаны лучшие индикаторы (V , n или m соответственно) потоков электронов соответствующей энергии для данного трехмесячного интервала времени. Для упрощения рисунка все индексы геомагнитной активности объединены в одну группу (m -случай). В верхней части рис. 4 показано изменение среднемесячного числа солнечных пятен в 23-м солнечном цикле.

Из рис. 4 видно, что даже для самой высокой энергии электронов ($E=2$ МэВ) имеются периоды, для которых лучшим индикатором потоков электронов на геостационарной орбите являются индексы геомагнитной активности. Таких периодов мало, в основном они появляются вблизи минимума солнечной активности и на фазе ее подъема. В период максимума и начала спада солнечного цикла (2001–2003 гг.) превалирует связь между потоками электронов и плотностью СВ. Скорость СВ в качестве лучшего индикатора потоков электронов релятивистской энергии проявляется эпизодически в течение всего солнечного цикла. Однако вероятность появления скорости СВ в качестве лучшего индикатора является преобладающей в диапазоне энергий $\sim(0.2\text{--}2.0)$ МэВ (см. рис. 5).

На рис. 5 показана частота наблюдения в качестве лучших индикаторов потоков электронов различных

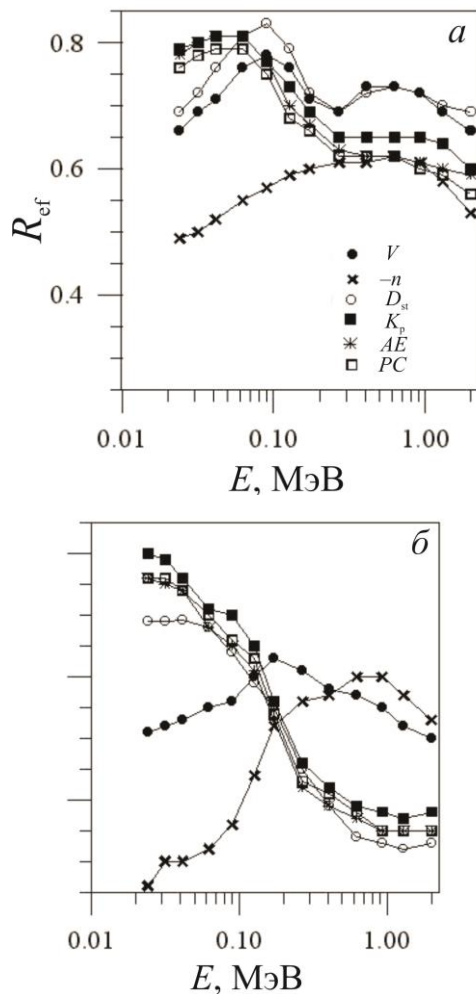


Рис. 3. Зависимость эффективности связи потоков энергичных электронов с параметрами СВ и индексами геомагнитной активности от энергии электронов для минимума (а) и максимума (б) 23-го солнечного цикла.

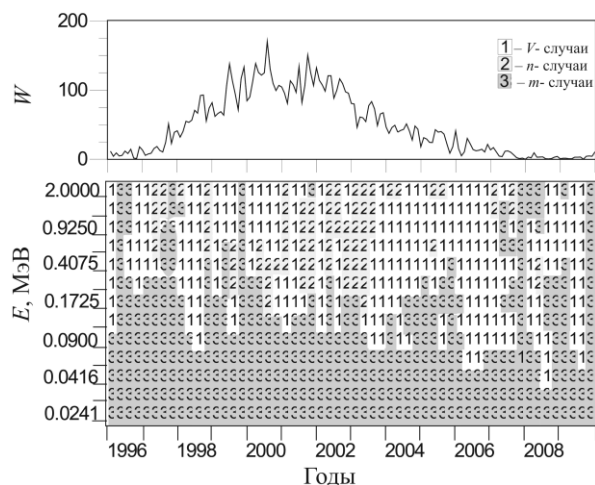


Рис. 4. Распределение наилучших индикаторов потоков электронов в зависимости от энергии электронов в течение 23-го цикла солнечной активности: V , n – скорость и плотность солнечного ветра; m – индексы геомагнитной активности (PC , AE , K_p и D_{st}).

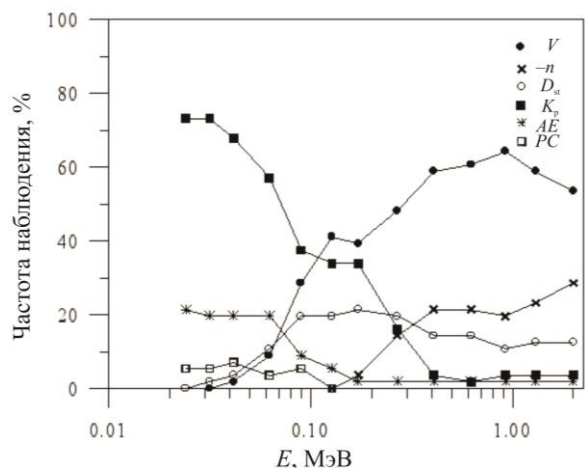


Рис. 5. Вероятность наблюдения в качестве лучшего индикатора потоков энергичных электронов на ГО параметров солнечного ветра и индексов геомагнитной активности в зависимости от энергии электронов для периода 1996–2009 гг.

параметров СВ и магнитосферы в зависимости от энергии электронов в 23-м солнечном цикле. Ниже ~ 100 кэВ лучшим индикатором является индекс геомагнитной активности K_p . Вероятность того, что скорость СВ будет лучшим индикатором потоков релятивистских электронов ($E > 300$ кэВ), составляет около 60 %. Вторым по значимости индикатором является плотность СВ (20–25 %). Более слабым индикатором (вероятность появления около 10–15 %) является D_{st} -индекс.

На рис. 6 сравниваются величины эффективности связи потоков электронов с параметрами СВ и индексами геомагнитной активности в зависимости от энергии для трех различных ситуаций: V -случаи, когда лучшим индикатором для интервала энергии электронов от 62.5 кэВ до 2 МэВ была скорость СВ; n -случаи, когда для энергии 625 кэВ и выше лучшим индикатором была плотность СВ, и m -случаи, когда лучшим индикатором потоков электронов были индексы геомагнитной активности для всего интервала энергий. Для V -случаев было выбрано десять трех-

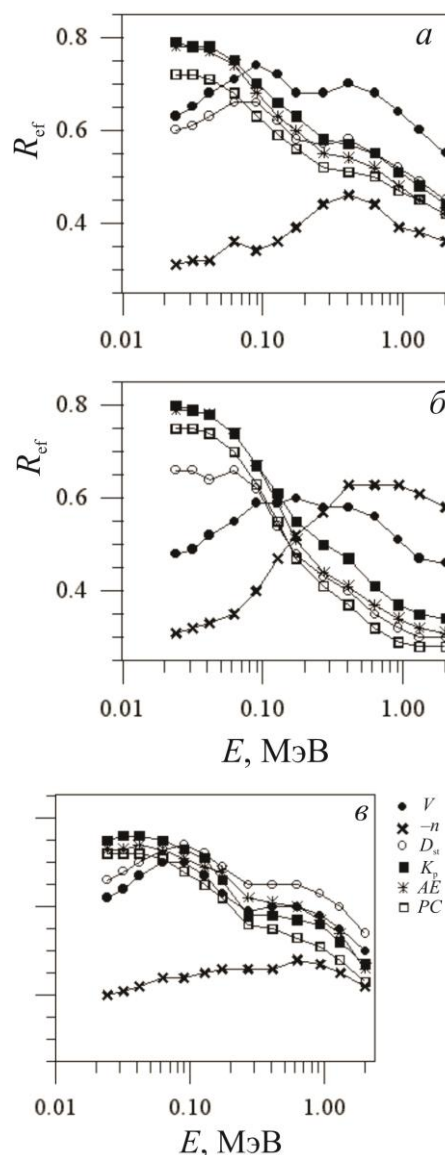


Рис. 6. Зависимость от энергии электронов эффективности связи среднесуточных потоков электронов с параметрами солнечного ветра и индексами геомагнитной активности для следующих периодов: когда лучшим индикатором на большей части интервала энергии электронов является скорость СВ (а); когда лучшими индикаторами являются плотность СВ для релятивистских электронов (б) и геомагнитные индексы на всем интервале энергии (в).

месячных интервалов, для n -случаев и m -случаев – по шесть трехмесячных интервалов.

Во всех рассмотренных случаях характер зависимости R_{ef} от энергии при использовании различных параметров для расчета корреляции с потоками электронов очень похож на подобную зависимость по полному 23-му циклу. Хорошая синхронность изменения R_{ef} в зависимости от энергии отмечается для индексов магнитной активности K_p , AE , PC . Для V - и n -случаев для всех энергий наибольшая величина R_{ef} среди этих индексов магнитной активности отмечается у K_p -индекса. Для m -случаев $R_{ef}(J, K_p)$ превышает $R_{ef}(J, AE)$ только для энергий менее ~ 150 кэВ. Для более высокоэнергичных частиц лучшим индикатором потоков электронов среди индексов K_p , PC и AE является AE -индекс. По условиям

отбора случаев: для V -случаев лучшим индикатором является скорость СВ для потоков электронов с энергией выше ~ 100 кэВ, для n -случаев – плотность СВ для энергий электронов свыше ~ 400 кэВ и для m -случаев – D_{st} -индекс для электронов энергий свыше $\sim (80-90)$ кэВ.

Для V - и m -случаев отмечается подобие в изменении $R_{ef}(J, V)$ и $R_{ef}(J, D_{st})$ в зависимости от энергий электронов. При этом для всех энергий электронов для m -случаев $R_{ef}(J, D_{st})$ превышает $R_{ef}(J, V)$, а для V -случаев наблюдается обратная картина: различие между $R_{ef}(J, V)$ и $R_{ef}(J, D_{st})$ в обоих случаях для $E > 100$ кэВ составляет $\sim (0.05-0.10)$. Это показывает, что процессы, в результате которых осуществляется связь потоков электронов со скоростью СВ, тесно связаны с развитием кольцевого тока, ответственного за D_{st} -индекс. По-видимому, ответ на вопрос, какой индекс или параметр СВ будет наилучшим индикатором потока электронов для конкретного трехмесячного интервала, зависит от конкуренции источников и потерь электронов в период конкретных магнитных бурь на этих интервалах.

3.3. Время реакции потоков электронов на изменения параметров СВ и индексов геомагнитной активности

Большинство авторов, исследовавших связь потоков энергичных электронов на ГО с параметрами СВ [Baker et al., 1994; Horne et al., 2007; Reeves et al., 2011; Потапов и др., 2012], определяли время реакции потоков электронов на изменения параметров СВ и индексов геомагнитной активности как 2–3 сут. В работе [Li et al., 2005] показано, что временная задержка всплесков потоков энергичных электронов относительно изменения скорости СВ зависит от полярности ММП. При $B_z < 0$ она меньше, а при $B_z > 0$ – больше. В работе [Lam, 2004] отмечалось, что сама технология расчета кросскорреляционной кривой предполагает зависимость ее основных параметров (R_{ef} и τ) от структуры потоков СВ для анализируемого интервала времени.

Для более детального анализа этого вопроса были проведены расчеты времени задержки (τ) потоков электронов с энергией более 2 МэВ на ГО в течение двух циклов солнечной активности для различных параметров СВ и индексов геомагнитной активности (см. рис. 7). При обработке данных R_{ef} и τ определялись для месячных массивов часовых данных, а затем производилось сглаживание по годичным интервалам.

Согласно рис. 7, лишь для параметра V задержка τ демонстрирует определенную зависимость от фазы солнечного цикла. Для остальных индикаторов такой зависимости не прослеживается, как и сходства между задержками для разных индикаторов (кроме K_p и D_{st}). Как отмечено в [Lam, 2004], график кросскорреляционной функции между потоками электронов и другими параметрами может иметь несколько сравнимых пиков или плоскую вершину, вследствие чего трудно произвести надежную оценку времени задержки. Тем не менее можно заключить, что большая задержка реакции потоков электронов на внешнее воздействие тяготеет к периодам максимумов солнечной активности.

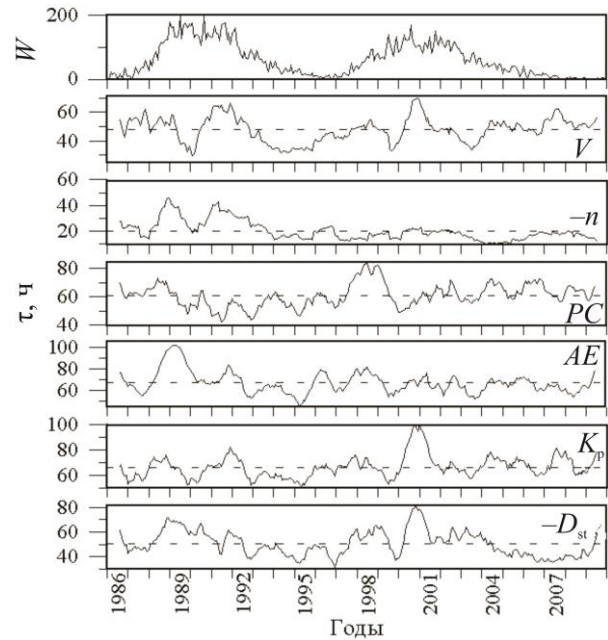


Рис. 7. Вариации времени задержки потоков электронов с энергией > 2 МэВ относительно параметров солнечного ветра и индексов геомагнитной активности для периода 1986–2009 гг.

На рис. 8 для 1996–2007 гг. показано распределение величин задержки реакции потоков электронов с энергией > 2 МэВ относительно вариаций скорости, плотности СВ и K_p -индекса (панель а), а также относительно скорости СВ для двух других диапазонов энергий электронов (панель б). Расчет проведен по часовым данным для месячных интервалов времени.

Рисунок 8, а показывает, что время задержки реакции потоков электронов с энергиями > 2 МэВ относительно вариаций скорости, плотности СВ и индекса K_p изменяется в довольно широких пределах и распределение задержек имеет весьма регулярный вид, отличающийся от «белого шума», и скорее напоминает пуассоновское. При этом в целом задержки минимальны для импульсов плотности солнечного ветра и максимальны для всплесков геомагнитных индексов (распределения времени задержки для D_{st} , AE и PC мало отличаются от распределения для K_p -индекса, поэтому на рисунке не приведены).

На рис. 8, б приведены распределения времени задержки реакции потоков электронов на ГО на вариации скорости СВ для двух других диапазонов энергий. Здесь наблюдается уже отмечавшаяся ранее [Дегтярев и др., 1995; Li et al., 2005] закономерность – увеличение времени задержки всплеска потоков электронов на ГО относительно импульса скорости СВ при увеличении энергии электронов. При этом в интервале энергий от 30 кэВ до, по крайней мере, 1500 кэВ время запаздывания реакции потоков электронов на вариации различных параметров представляет собой линейную функцию от логарифма энергии электронов [Дегтярев и др., 1995].

На рис. 8, б заметно еще одно, на наш взгляд, очень важное различие в отклике потоков электронов разной энергии на вариации скорости СВ. Время задержки этих откликов не только зависит от энергии электронов, но и имеет совершенно другое распре-

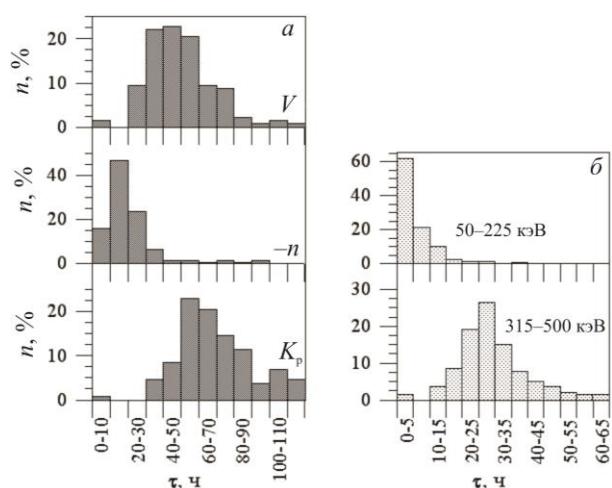


Рис. 8. Гистограмма величин задержки реакции потоков электронов относительно вариаций параметров СВ и индексов геомагнитной активности для периода 1996–2007 гг.: для потоков электронов с энергией >2 МэВ и скорости и плотности СВ, а также K_p -индекса (а); для потоков электронов в диапазоне энергий 50–225 и 315–1500 кэВ и скорости СВ (б).

деление: для высокоэнергичных электронов это распределение имеет вид колокола (как и на рис. 8, а), а для низкоэнергичных электронов оно похоже на экспоненциальное. При этом пороговая энергия близка к ~ 200 кэВ (это значение энергии мы уже выделяли выше при обсуждении рис. 3).

4. Обсуждение результатов

В представленной статье мы обобщили и дополнили ранее полученные результаты [Lam, 2004; Mann et al., 2004; Потапов и др., 2012] по вариациям эффективности связи потоков релятивистских электронов на ГО со скоростью СВ в течение циклов солнечной активности. Была проанализирована также связь потоков электронов широкого спектра энергий (от авроральных до релятивистских) не только со скоростью СВ, но и с плотностью СВ и с индексами геомагнитной активности, отражающими развитие магнитосферных возмущений в различных областях магнитосферы. Ниже обсуждаются основные полученные результаты.

4.1. Начнем с изложения основных теоретических представлений о цепочке процессов и механизмов, обеспечивающих связь параметров СВ с потоками электронов на ГО. Несмотря на то, что сводной и самосогласованной теоретической модели этой цепочки пока не создано, фрагменты ее разработаны весьма подробно, широко представлены в печати и вряд ли нуждаются в ссылках. Эти фрагменты мы будем использовать при интерпретации результатов нашего статистического анализа.

Названные процессы и механизмы делятся на две основные группы: механизмы, обеспечивающие поступление в магнитосферу потока энергии и частиц из СВ (назовем их пограничными), и механизмы ускорения частиц внутри магнитосферы (внутримагнитосферные).

В качестве теоретических моделей пограничных механизмов наибольшее признание получили две: пересоединение силовых линий межпланетного

магнитного поля (ММП) на магнитопаузе и неустойчивость Кельвина–Гельмгольца. Обе они предполагают развитие плазменных неустойчивостей до нелинейного режима, обеспечивающих интенсивное взаимодействие «волна–частица» и, как следствие, «аномальные» значения коэффициентов переноса частиц и энергии. Теоретические исследования показывают, что первый механизм в основном контролируется компонентой B_z ММП, а второй – скоростью СВ (но зависит также от плотности СВ и, в меньшей степени, от ММП).

Развитие внутримагнитосферных процессов в рассматриваемой нами цепочке включает два этапа. Первый этап – генерация в хвосте магнитосферы (в околоземной части плазменного слоя) так называемых зародышевых (seed) электронов с энергиями от десятков до сотен кэВ в процессе развития магнитосферных бурь и суббурь. Экспериментальная информация о динамике и интенсивности этих процессов содержится в использованных нами выше геомагнитных индексах D_{st} , K_p , AE и PC . Второй этап – это перенос зародышевых электронов в глубь магнитосферы (в том числе до ГО) и дополнительное их ускорение. Среди этих процессов есть как адиабатические дрейф и ускорение, так и диффузия в фазовом пространстве в результате резонансных взаимодействий электронов с электромагнитными волнами. Следует отметить, что для реализации первого этапа вполне достаточно развития даже изолированной суббури и совсем не обязателен всплеск скорости СВ. Концепции двухэтапного ускорения электронов до релятивистских энергий придерживается большинство исследователей [Baker et al., 1998b; Meredith et al., 2002, 2003; Horne et al., 2005; Li et al., 2005].

4.2. Результаты нашего анализа, приведенные выше на рис. 3, 5 и 6, на которых наблюдается существенное различие в отклике низкоэнергичных и релятивистских электронов на изменения индикаторов, можно интерпретировать следующим образом. Низкоэнергичные электроны – это результат реализации лишь первого этапа ускорения частиц (см. п. 4.1); они не участвуют в дополнительном резонансном ускорении, контролируемом скоростью СВ. Поэтому они хорошо коррелируют с геомагнитными индексами и плохо – со скоростью СВ. А для всплеска релятивистских электронов на ГО необходимым условием является значительное дополнительное ускорение на электромагнитных волнах, порожденных неустойчивостью Кельвина–Гельмгольца. Вот почему для релятивистских электронов преобладает корреляция со скоростью СВ.

Этот вывод подтверждается результатами, приведенными на рис. 8. Так, рис. 8, б наглядно показывает, что процесс переноса зародышевых электронов на ГО без резонансного доускорения (энергии 50–225 кэВ) занимает очень мало времени. Наоборот, дополнительное ускорение (до энергий 315–1500 кэВ) требует более суток. Различие функций распределения времени задержки на рис. 8, б также указывает на различие механизмов переноса для низко- и высокоэнергичных электронов. Поро-

говая энергия, разделяющая два режима переноса, как и на рис. 3, 5 и 6, близка к ~ 200 кэВ.

Рисунок 8, а дает дополнительную информацию об особенностях резонансного ускорения зародышевых электронов до релятивистских энергий. Верхняя панель показывает, что резонансное доускорение длится в среднем 2–3 сут, но при этом, как видно на нижней панели, доускоряются зародышевые электроны, сгенерированные раньше всплеска скорости СВ (процессы их генерации контролирует магнитный индекс K_p). Вместе с тем видно, что зародышевые электроны, порожденные, например, 30–40 ч назад (и таких случаев, как видно на нижней панели, значительно меньше), также успешно набирают релятивистские энергии (см. верхнюю панель). Малое время задержки (0–10 и даже 20–30 ч) обнаруживается для электронов, уже участвующих в доускорении, инициированном предыдущими всплесками скорости СВ.

4.3. Выше, в разделе 3.1, для расширенного временного интервала нами был подтвержден вывод [Mann et al., 2004; Потапов и др. 2012] о том, что основной особенностью вариаций эффективности связи потоков энергичных электронов с параметрами СВ (скоростью и плотностью) и с индексами геомагнитной активности является высокая корреляция в периоды конца спада солнечной активности и в минимуме цикла и низкая корреляция в годы максимумов солнечной активности. Нет сомнения, что этот эффект связан со структурными изменениями в СВ в течение солнечного цикла.

Действительно, на поздней фазе спада и в минимуме солнечного цикла в СВ преимущественно наблюдаются высокоскоростные рекуррентные потоки солнечного ветра, эмитированные из трансэкваториальных корональных дыр [Baker et al., 1997]. В период максимума солнечной активности в солнечном ветре преобладают спорадические выбросы корональной массы (CME) [Baker, Kanekal, 2008; Miyoshi, Kataoka, 2011].

На рис. 9, в, г показано число появлений случаев магнитных бурь (МБ), связанных с CIR (corotating interaction regions) и CME (CIR-МБ и CME-МБ соответственно) для периода с 1996 по 2008 г. (адаптировано из [Miyoshi, Kataoka, 2011]). Здесь же на панели б показаны рассчитанные нами вариации R_{ef} для связи потоков электронов на ГО (энергии более 2 МэВ) со скоростью СВ. Видно, что случаи CME-МБ наиболее часты в максимуме солнечного цикла. С появлением CME-бурь в 1997 г. отмечается резкое уменьшение R_{ef} . Уменьшение R_{ef} наблюдается и в 2000–2001 гг., когда количество спорадических CME-МБ увеличивается. С началом фазы спада происходит уменьшение количества CME-МБ и увеличение R_{ef} . Рекуррентные потоки (CIR-случаи), напротив, соответствуют повышению эффективности связи электронов со скоростью СВ. Так, в 1996 г. имеется высокий уровень связи потоков со скоростью СВ. Создается впечатление, что рекуррентные потоки способствуют формированию временного профиля потоков электронов на ГО, более подобного временному профилю скорости СВ. При увеличении солнечной активности появляются спорадические

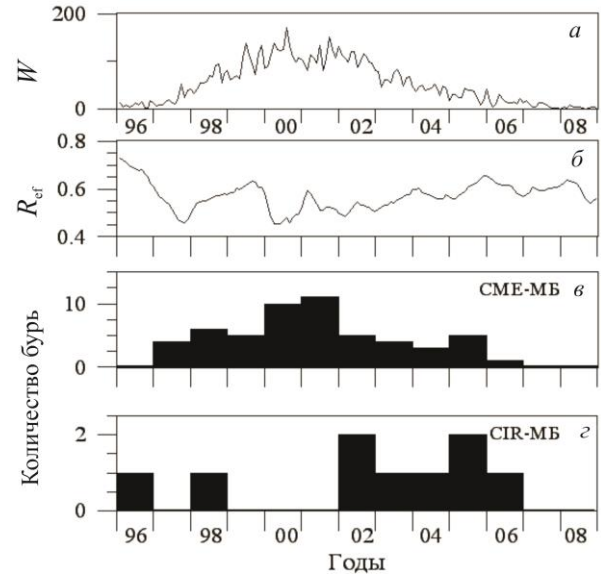


Рис. 9. Изменение в 23-м солнечном цикле числа солнечных пятен (а), эффективности связи потоков электронов с энергией $E > 2$ МэВ со скоростью солнечного ветра (б) и числа магнитных бурь, связанных со случаями CME* (в) и CIR* (г). (*Адаптировано из работы [Miyoshi et al., 2011].)

потоки, пространственная структура которых (профиль скорости и плотности) отличается от рекуррентных и которые «хаотизируют» процессы доускорения зародышевых электронов, приводя к уменьшению R_{ef} .

4.4. Все обсуждаемые результаты были получены нами (как и подавляющим большинством упоминавшихся выше исследователей) с использованием корреляционного анализа временных рядов экспериментальных данных. Поэтому интересно обсудить особенности применения этого аппарата к нашей задаче моделирования всплесков потоков электронов на ГО. В принципе, корреляционный анализ двух временных рядов каких-либо величин дает лишь количественную оценку сходства временных профилей этих величин. Так, достаточно высокий коэффициент корреляции между потоками релятивистских электронов и скоростью СВ ($R_{ef} \sim 0.6-0.7$) в период поздней фазы спада и минимума солнечной активности говорит о сходстве временных профилей скорости СВ и потоков релятивистских электронов, но не о наличии причинно-следственной связи между ними. Эту связь мы фактически постулируем (см. п. 3.1). Такое постулирование является общепринятым, за исключением, может быть, работы [Потапов и др., 2012], в которой предполагается, что это сходство является случайным фактором и временные профили скорости СВ и потоков J релятивистских электронов на ГО формируются совершенно различными и не связанными между собой механизмами.

Но если между V и J существует цепочка причинно-следственных связей (см. п. 3.1), то почему $R_{ef}(V, J)$ не принимает значения, более близкие к единице, почему связь (корреляция) низкоэнергичных электронов ($E < 100-200$ кэВ) с геомагнитными индексами лучше, чем с параметрами СВ,

а у релятивистских частиц – наоборот? Мы считаем, что эти (и другие) результаты, приведенные выше в п. 3, хорошо укладываются в следующую схему.

Всплеск (импульс) скорости или плотности СВ будем рассматривать как некий сигнал, поступающий в систему «магнитосфера», состоящую из вложенных в нее подсистем, каждая из которых характеризуется своей «передаточной функцией» и своим характерным временем реакции (отклика) на внешнее воздействие.

Первая подсистема – это магнитопауза. На ней развиваются неустойчивости, и динамика преобразования входного сигнала определяется порогом этих неустойчивостей. Входной сигнал из механического (импульс скорости) преобразуется в электромагнитный. При этом возможны запаздывание сигнала и его деформация, определяемая сверткой с характерными временами развития неустойчивостей и их перехода в нелинейный режим.

Вторая подсистема – это ближняя к Земле кромка плазменного слоя, где генерируются зародышевые электроны. Известно [Зеленый, Веселовский, 2008], что характерные времена активизации этой подсистемы от внешнего сигнала составляют примерно 5 мин (микросуббури) и 2 ч (суббури). Это небольшие запаздывания, но существенными при этом являются «размножение и дискретизация» отклика – возникают цуги микроинжекций электронов, длящиеся в некоторых случаях до нескольких суток (магнитосферная буря). К этой подсистеме мы отнесем зародышевые электроны, квазиadiaбатически дрейфующие к ГО, они после дрейфа составят низкоэнергичную часть ($E < 200$ кэВ) ее популяции. Динамика этой низкоэнергичной части фактически мало зависит от первой подсистемы и определяется развитием внутримagnetосферных трехмерных токовых систем, которое отражается в геомагнитных индексах. Следовательно, эти индикаторы и являются преобладающими. «Автономное» поведение этой подсистемы иллюстрирует рис. 8, б.

Третья подсистема – это внешняя магнитосфера с ее электромагнитными резонансами и дрейфующими зародышевыми электронами. Magnetосферные резонансы, возбужденные процессами на магнитопаузе (первая подсистема), обеспечивают дополнительное ускорение (второй этап) зародышевых электронов до релятивистских энергий. Исходный сигнал (импульс скорости СВ) испытывает еще одну трансформацию – появляется всплеск потоков энергичных электронов (в том числе со значительным запаздыванием на ГО). В третьей подсистеме зародышевые электроны из второй подсистемы играют второстепенную и «хаотизирующую» роль в динамике сигнала из-за того, что они представлены в виде цугов. Эта хаотизация – основная причина ухудшения корреляционной связи всплеска энергичных электронов с геомагнитными индексами. Она же, с учетом нелинейности процессов в первой и третьей подсистемах, позволяет понять, почему $R_{ef}(V, J)$ не превышает значений $\sim (0.6-0.7)$ и почему статистика задержек всплесков энергичных электронов

на ГО (рис. 8) имеет вид, характерный для случайных процессов.

4.5. Результаты, приведенные в п. 3.2, не дают прямого ответа на вопрос, какие индикаторы являются наилучшими при моделировании возмущений потоков электронов на ГО. Оказывается, что эффективность индикаторов достаточно сложным образом зависит и от энергии рассматриваемых электронов, и от солнечной активности (структуры солнечного ветра). Вместе с тем наши результаты вполне определенно указывают на то, что для электронов с энергией менее $\sim 100-200$ кэВ наилучшими индикаторами являются геомагнитные индексы K_p и AE . Это и понятно, поскольку электроны этих энергий образуются в результате одноэтапных (см. п. 3.1) внутримagnetосферных возмущений, сопровождаемых интенсификацией трехмерных токовых систем.

Для электронов с энергией около 300 кэВ и выше (двухэтапные процессы) лучшим индикатором становится скорость солнечного ветра, а вторым по значимости – его плотность. В цикле солнечной активности скорость как индикатор лучше в периоды перед максимумом, в максимуме и на поздней фазе спада солнечного цикла, а плотность – в начале подъема и на спаде солнечного цикла.

Анализ эффективности индикаторов по трехмесячным временным интервалам позволил выделить V -, n - и m -случаи преобладания, соответственно, скорости СВ, плотности СВ и геомагнитных индексов. В среднем для m -случаев регистрируется более высокая геомагнитная активность и, при примерно равной скорости СВ, большие плотность СВ и величина отрицательной B_z -компоненты ММП, чем для V -случаев.

Эти результаты являются предварительными и требуют проведения более подробных исследований (в том числе на малых временных интервалах) влияния структуры солнечного ветра на эффективность различных индикаторов.

5. Выводы

5.1. Статистический анализ однородных данных о потоках релятивистских электронов на геостационарной орбите за два полных цикла солнечной активности (1986–2009 гг.) подтвердил результаты предыдущих исследователей, что наилучшая корреляционная связь потоков электронов с параметрами солнечного ветра и индексами геомагнитной активности отмечается в периоды минимумов солнечных циклов, а наихудшая – в периоды максимумов солнечной активности. При этом обнаружено, что лучшая связь потоков релятивистских электронов с индексами геомагнитной активности наблюдается в минимумах и близких к минимуму фазах подъема и спада солнечного цикла, для плотности солнечного ветра – в максимуме солнечного цикла и для скорости солнечного ветра – в периоды подъема и спада солнечного цикла ближе к максимуму.

5.2. Для больших временных периодов (более года) наилучшим индикатором потоков релятивистских электронов является скорость солнечного ветра. С уменьшением длины анализируемого временного интервала эффективность этого индикатора

уменьшается. Для трехмесячных периодов скорость солнечного ветра является лучшим индикатором в ~60 % всех случаев, в ~20 % всех случаев лучшим индикатором является плотность солнечного ветра и в ~20 % всех случаев – индексы геомагнитной активности.

5.3. Для потоков низкоэнергичных электронов (до 100–150 кэВ) практически во всех случаях лучшая связь отмечается с индексами геомагнитной активности.

5.4. Результаты расчета времени задержки между вариациями потоков энергичных электронов на ГО и изменениями в параметрах СВ и индексах геомагнитной активности выявили существенное различие в механизмах ускорения низко- и высокоэнергичных электронов. Ускорение электронов до релятивистских энергий происходит в два этапа, причем второй из них сопровождается возбуждением магнитосферных резонансов, непосредственно связанным с параметрами солнечного ветра.

5.5. Предложен предварительный вариант системного подхода к корреляционному анализу потоков электронов на ГО, в котором магнитосфера представлена как система, состоящая из трех вложенных в нее подсистем (см. п. 4.4). Перспективность его дальнейшего развития подтверждается тем, что он позволяет объяснить наличие верхних пределов в расчетах коэффициентов корреляции и обнаруженные закономерности в рассчитанных временах задержек.

Авторы благодарят [Reeves et al., 2011] за обеспечение базой данных по потокам электронов на ГО по измерениям спутников LANL, а также составителей и авторов баз данных по потокам электронов по измерениям спутников GOES, данных OMNI по солнечному ветру и баз данных по магнитным индексам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дегтярев В.И., Платонов О.И., Попов Г.В. Долготный эффект в изменениях спектров частиц, регистрируемых на геостационарных спутниках // Геомагнетизм и аэронаука. 1985. Т. 25, № 6. С. 1002–1004.
- Дегтярев В.И., Жеребцов Г.А., Шешуков С.С. Динамика потоков электронов на геостационарной орбите и их связь с изменением параметров солнечного ветра и геомагнитной активностью // Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. Новосибирск: Наука, 1995. Вып. 103. С. 62–72.
- Дмитриев А.В., Бахарева М.Ф., Суворова А.В. Связь динамики энергичных электронов внешнего радиационного пояса Земли с параметрами солнечного ветра // Солнечно-земная физика. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. Вып. 2 (115). С. 182–184.
- Плазменная гелиофизика / Под ред. Л.М. Зеленого, И.С. Веселовского. М.: Физматлит, 2008. Т. 2. 560 с.
- Попов Г.В., Дегтярев В.И., Чудненко С.Э. Некоторые особенности влияния параметров солнечного ветра на динамику электронов, наблюдаемых на геостационарной орбите // Актуальные проблемы физики солнечной и звездной активности: Конференция стран СНГ и Прибалтики. Сб. докладов в 2 тт. Нижний Новгород, 2003. Т. 2. С. 512–515.
- Потапов А.С., Цэгмэд Б., Рыжакова Л.В. Связь потоков релятивистских электронов на геостационарной орбите с уровнем УНЧ-активности на поверхности Земли и в солнечном ветре в 23-м цикле солнечной активности // Космические исследования. 2012. Т. 50, № 2. С. 130–146.
- Романова Н.В., Пилипенко В.А., Ягова Н.В., Белов А.В. Статистическая связь частоты сбоев на геостационарных спутниках с потоками энергичных электронов и протонов // Космические исследования. 2005. Т. 43, № 3. С. 186–193.
- Baker D.N., Blake J.B., Callis L.B., et al. Relativistic electron acceleration and decay time scales in the inner and outer radiation belts: SAMPEX // Geophys. Res. Lett. 1994. V. 21, N 6. P. 409–412.
- Baker D.N., Li X., Turner N., et al. Recurrent geomagnetic storms and relativistic electron enhancements in the outer magnetosphere: ISTP coordinated measurements // J. Geophys. Res. 1997. V. 102, N A7. P. 14,141–14,148.
- Baker D.N., Allen J.H., Kanekal S.G., Reeves G.D. Disturbed space environment may have been related to pager satellite failure // Eos Trans. AGU. 1998a. V. 79, N 40. P. 477, 482–483. doi:10.1029/98EO00359.
- Baker D.N., Li X., Blake J.B., Kanekal S. Strong electron acceleration in the Earth's magnetosphere // Adv. Space Res. 1998b. V. 21. P. 609–613.
- Baker D.N., Kanekal S.G. Solar cycle changes, geomagnetic variations, and energetic particle properties in the inner magnetosphere // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2008. V. 70. P. 195–206.
- Degtyarev V.I., Popov G.V., Xue B.S., Chudnenko S.E. Input parameters for models of energetic electrons fluxes at the geostationary orbit // Chin. J. Space Sci. 2005. V. 25, N 5. P. 424–429.
- Degtyarev V.I., Chudnenko S.E., Kharchenko I.P., et al. Prediction of maximal daily average values of relativistic electron fluxes in geostationary orbit during the magnetic storm recovery phase // Geomagnetism and Aeronomy. 2009. V. 49, N 8. P. 1208–1217.
- Dmitriev A.V., Chao J.K. Dependence of geosynchronous relativistic electron enhancements on geomagnetic parameters // J. Geophys. Res. 2003. V. 108, N A11. C. 1/1–1/12.
- Fennell J.F., Koons H.C., Roeder J.L., Blake J.B. Spacecraft charging: Observations and relationship to satellite anomalies // Proc. 7th Spacecraft Charging Technology Conference. ESA SP-476. 2001. P. 279–286.
- Horne R.B., Thorne R.M., Glauert S.A., et al. Timescale for radiation belt electron acceleration by whistler mode chorus waves // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. A03225. doi:10.1029/2004JA010811.
- Horne R.B., Thorne R.M., Glauert S.A., et al. Electron acceleration in the Van Allen radiation belts by fast magnetosonic waves // Geophys. Res. Lett. 2007. V. 34. L17107. doi:10.1029/2007GL030267.
- Iucci N., Levitin A.E., Belov A.V., et al. Space weather conditions and spacecraft anomalies in different orbits // Space Weather. 2005. V. 3. S01001. doi: 10.1029/2003SW000056.
- Kellerman A.C., Shprits Y.Y. On the influence of solar wind conditions on the outer-electron radiation belt // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. A05217. doi:10.1029/2011JA017253.
- Lam H.-L. On the prediction of relativistic electron fluence based on its relationship with geomagnetic activity over a solar cycle // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2004. V. 66, N 18. P. 1703–1714.
- Li X., Temerin M., Baker D.N., et al. Quantitative prediction of radiation belt electrons at geostationary orbit based on solar wind measurements // Geophys. Res. Lett. 2001. V. 28, N 9. P. 1887–1890.
- Li X., Temerin M.A. The electron radiation belt // Space Sci. Rev. 2001. V. 95. P. 569–580.
- Li X., Baker D.N., Temerin M., et al. Energetic electrons, 50 keV to 6 MeV, at geosynchronous orbit: Their responses to solar wind variations // Space Weather. 2005. V. 3. S04001. doi:10.1029/2004SW000105.
- Li X., Barker A.B., Baker D.N., et al. Modeling the deep penetration of outer belt electrons during the “Halloween” magnetic storm in 2003 // Space Weather. 2009. V. 7. S02004. doi:10.1029/2008SW000418.

Lyatsky W., Khazanov G.V. Effect of solar wind density on relativistic electrons at geosynchronous orbit // *Geophys. Res. Lett.* 2008a. V. 35. L03109. doi:10.1029/2007GL032524.

Lyatsky W., Khazanov G.V. Effect of geomagnetic disturbances and solar wind density on relativistic electrons at geostationary orbit // *J. Geophys. Res.* 2008b. V. 113. A08224. doi:10.1029/2008JA013048.

Mann I.R., O'Brien T.P., Milling D.K. Correlations between ULF wave power, solar wind speed, and relativistic electron flux in the magnetosphere: Solar cycle dependence // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2004. V. 66, N 2. P. 187–198.

Meredith N.P., Horne R.B., Iles R.H.A., et al. Outer zone relativistic electron acceleration associated with substorm-enhanced whistler mode chorus // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107, N A7. P. 1144. doi:10.1029/2001JA900146.

Meredith N.P., Cain M., Horne R.B., et al. Evidence for chorus-driven electron acceleration to relativistic energies from a survey of geomagnetically disturbed periods // *Ibid.* 2003. V. 108, N A6. P. 1248. doi:10.1029/2002JA009764.

Miyoshi Y., Kataoka R. Solar cycle variations of outer radiation belt and its relationship to solar wind structure dependences // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2011. V. 73, N 1. P. 77–87.

O'Brien T.P., McPherron R.L., Sornette D., et al. Which magnetic storms produce relativistic electrons at geosynchronous orbit // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106, N A8. P. 15,533–15,544.

Reeves G.D., Morley S.K., Friedel R.H.W., et al. On the relationship between relativistic electron flux and solar wind velocity: Paulikas and Blake revisited // *Ibid.* V. 116. A02213. doi:10.1029/2010JA015735.

Wrenn G.L., Sims A.J. Internal charging in the outer zone and operational anomalies // *Radiation Belts: Models and standards* / Eds. J. Lemaire, D. Heynderickx, D.N. Baker. 1996. P. 275–278. (American Geophysical Union Geophysical Monograph. V. 97.)

Xue B.S. Study of the enhancement events of relativistic electron at the geosynchronous orbit // *Chin. J. Space Sci.* 2005. V. 25, N 5. P. 383–386.

<ftp://ftp.agu.org/apend/ja/2010ja015735>.

http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp_public/.

<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>.

<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html>.

<http://www.wdcb.ru/stp/data/geomagni.ind/pc/>.

¹Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

²Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Россия