

УДК 550.385.37;550.385.1;551.590.21

## СВЯЗЬ ПОТОКОВ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ НА ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЕ С УРОВНЕМ УНЧ АКТИВНОСТИ НА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ И В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ В 23-М ЦИКЛЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

© 2012 г. А. С. Потапов<sup>1</sup>, Б. Цэгмэд<sup>1,2</sup>, Л. В. Рыжакова<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск  
potapov@iszf.irk.ru

<sup>2</sup>Исследовательский центр астрономии и геофизики МАН, Улан-Батор, Монголия  
tseg@iszf.irk.ru

<sup>3</sup>Иркутский государственный технический университет  
ryzhakvalarisa@rambler.ru

Поступила в редакцию 28.09.2010 г.

Представлены результаты кросскорреляционного анализа, выполненного на основе метода ранговой корреляции по Спирмену, между суточными значениями флюенса энергичных электронов на геосинхронной орбите, интенсивностью наземных и межпланетных ультранизкочастотных (УНЧ) колебаний в диапазоне Pc5 и параметрами солнечного ветра за период 23-го цикла солнечной активности 1996–2006 годов. В качестве наземных данных взяты дневные (с 6 до 18 часов LT) магнитные измерения на двух диаметрально расположенных обсерваториях сети Интермагнет. Потоки электронов с энергией более 2 МэВ измерялись на геосинхронных спутниках GOES. Данные магнитометров и плазменных датчиков, установленных на космических аппаратах ACE и WIND, использовались для анализа параметров солнечного ветра и осцилляций межпланетного магнитного поля (ММП). Получен ряд результатов, высвечивающих роль межпланетных УНЧ волн в процессах генерации магнитосферных колебаний и ускорении энергичных электронов. Среди них высокая и устойчивая корреляция наземных УНЧ колебаний с волнами в солнечном ветре; более тесная связь среднесуточных амплитуд и межпланетных, и наземных колебаний с “завтрашними” значениями скорости солнечного ветра, чем с текущими; корреляция нормированной на напряженность ММП интенсивности УНЧ волн в солнечном ветре с потоками релятивистских электронов в магнитосфере.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Среди множества работ, посвященных длиннопериодным устойчивым колебаниям геомагнитного поля (их альтернативные названия: геомагнитные пульсации типа Pc5, ультранизкочастотные (УНЧ) осцилляции, магнитосферные колебания и т.д.), целый класс статей касается тесной связи УНЧ колебаний со скоростью солнечного ветра (СВ) [1–7]. В последнее время интерес к самим пульсациям и к их связи с высокоскоростными потоками солнечного ветра был подогрет тем обстоятельством, что появились теоретические разработки [8–10], приписывающие этим магнитосферным колебаниям с частотой от долей до нескольких миллигерц заметную, если не основную роль в ускорении электронов радиационных поясов до релятивистских энергий (более 1–2 МэВ). Эти электроны представляют серьезную угрозу для работоспособности аппаратуры высокоорбитальных космических аппаратов, в частности, находящихся на геосинхронной орбите [11–12]. Популяция энергичных электронов усиливается после погружения земной маг-

нитосферы в высокоскоростной поток солнечного ветра. Таким образом, и УНЧ колебания, и потоки релятивистских электронов оказываются связанными со скоростью солнечного ветра, что подтверждается статистическими исследованиями [13–14, 7], в том числе и по данным измерений за цикл солнечной активности [15]. Однако во всех перечисленных работах использовались внутриманитосферные наблюдения УНЧ активности. В то же время известно, что волны миллигерцового диапазона имеются и в солнечном ветре, более того, ряд авторов считает, что они могут быть прямым образом связаны с наземными УНЧ колебаниями [16–17]. С целью проследить взаимосвязи межпланетных и внутриманитосферных УНЧ осцилляций со скоростью солнечного ветра и с потоками релятивистских электронов на большом статистическом материале мы выполнили анализ одновременных наблюдений потоков энергичных электронов, наземных пульсаций типа Pc5, УНЧ волн в межпланетной среде и основных параметров солнечного ветра за период 23-го цикла солнечной активности 1996–2006 гг.

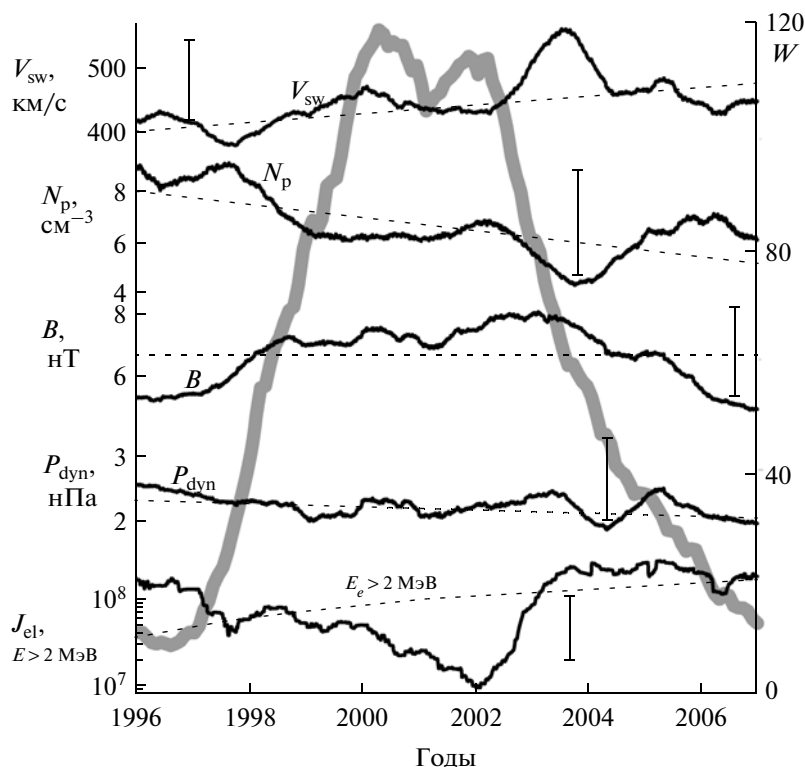
## 2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И ПРОЦЕДУРА ИХ ОБРАБОТКИ

Данные по релятивистским электронам за период 1996–2006 гг. были взяты с сайта <http://www.swpc.noaa.gov/ftpmenu/warehouse.html>, где имеются суточные значения флюенса (интегрального за сутки потока) электронов с энергией более 2 МэВ, начиная с 1996 г. Измерения частиц велись на борту геостационарных спутников *GOES-7* (1996 г.), *GOES-8* (1999–2002 гг.), *GOES-9* (1997–1998 гг.) и *GOES-12* (2003–2006 гг.).

Для отслеживания активности УНЧ колебаний на поверхности земли в качестве исходного материала были взяты минутные данные двух почти диаметрально расположенных магнитных обсерваторий: Нурмиярви (NUR) с исправленными геомагнитными координатами  $\Phi = 56.9^\circ$ ,  $\Lambda = 102.3^\circ$ , и Ситка (SIT)  $\Phi = 59.8^\circ$ ,  $\Lambda = 280.3^\circ$ . Обе станции входят в мировую сеть магнитных обсерваторий INTERMAGNET. В случае отсутствия данных за какие-то сутки на одной из этих станций использовались данные близлежащих обсерваторий сети INTERMAGNET. Для каждой из станций формировались годовые массивы минутных данных по трем компонентам. Эти массивы пропускались затем через полосовой фильтр Мармё [18] с частотами обрезания, равными 1 мГц и 5 мГц, чтобы получить годовые трехкомпонентные ряды минутных значений УНЧ колебаний в диапазоне Pc5. Далее, поскольку различие в геомагнитной широте станций даже на три градуса дает ощутимую разницу в интенсивности регистрируемых колебаний, амплитуды осцилляций одной станции были приведены к амплитудам другой путем нормировки. Затем из полученных отфильтрованных и нормированных минутных значений трех компонент УНЧ, измеренных на двух диаметральных станциях, формировались суточные массивы, содержащие минутные значения только дневных часов, то есть использовались измерения, выполненные на каждой из станций с 6 до 18 часов местного времени. Для обсерватории NUR дневные часы соответствовали интервалу 04–16 UT, а для обсерватории SIT — интервалу 16–04 UT. Сделано это было для того, чтобы по возможности очистить данные от резких выбросов и иррегулярных вариаций, характерных в большей степени для ночных часов. (По этой же причине для анализа были выбраны станции, достаточно далекие от авроральных электроджетов, генерирующих сильные иррегулярные магнитные вариации, не имеющие отношения к пульсациям Pc5.) Затем по каждой из компонент вычислялись суточные значения среднеквадратичного отклонения и подсчитывались их усредненные по трем компонентам значения, которые в дальнейшем использовались в качестве суточных оценок интенсивности (амплитуды)  $A$  наземных УНЧ ко-

лебаний. Кроме того, с использованием полученных после фильтрации и нормировки массивов дневных значений, вычислялись суточные оценки спектральной плотности колебаний каждой из компонент, как функций частоты в диапазоне 1–5 мГц на основе быстрого Фурье-преобразования и подсчитывалась суммарная по трем компонентам суточная спектральная плотность. Далее, в каждой из частотных полос 1–2, 2–3, 3–4 и 4–5 мГц находились суточные максимальные значения суммарной спектральной плотности  $F_{\text{gr}i}$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) и соответствующих частот.

Аналогичные манипуляции производились с данными наблюдений УНЧ волн в солнечном ветре, кроме, естественно, объединения в один ряд дневных значений двух станций. В качестве исходных использовались данные с высоким временным разрешением, измеренные трехкомпонентными магнитометрами космических аппаратов *ACE* и *WIND*. Отбирались лишь измерения, выполненные вблизи точки либрации  $L1$  на расстоянии около 1.5 млн. км от Земли вверх по потоку солнечного ветра (СВ). Наиболее однородным является ряд данных с 1999 по 2006 гг., когда использовались только 16-секундные измерения *KA ACE*, непрерывно находившегося весь этот период в окрестности  $L1$ . Данные за время с 1996 по 1998 гг. пришлось комплектовать из измерений двух *KA* — *ACE* и *WIND*, причем в качестве данных *KA WIND* были взяты минутные значения, приведенные к головной ударной волне (то есть, с 45-минутным запаздыванием [19]) и выставленные на сайте GSFC/SPDF OMNIWeb (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov>). Поскольку мы в дальнейшем работали со среднесуточными величинами, то не принимали в расчет сдвиг, связанный с распространением солнечного ветра от точки либрации до головной ударной волны, составляющий обычно от 0.5 до 1.4 часа. Но нам было важно использовать измерения, не искаженные процессами, происходящими в так называемой предударной (preshock) области перед околосолнечным ударным фронтом. Измерения *KA WIND*, даже приведенные к положению головной ударной волны, этому условию удовлетворяли. Тем не менее, характеристики магнитометров и временное разрешение данных на *KA ACE* и *WIND* были разными. Поэтому полученный после описанной выше процедуры ряд суточных значений амплитуды межпланетных УНЧ волн  $S$  и суточных оценок спектральной плотности этих волн  $F_{\text{si}}$  для периода 1996–1998 гг. оказался не совсем однородным, и в дальнейшем мы используем его ограниченно. Отметим, что помимо оценки амплитуды УНЧ волн по среднеквадратичному отклонению  $S$  магнитных измерений за сутки, отфильтрованных в диапазоне 1–5 мГц, мы использовали также суточные значения  $S/B$  —



**Рис. 1.** Вариации параметров солнечного ветра и флюенса релятивистских электронов в 23-м цикле солнечной активности.

амплитуды, нормированной на напряженность межпланетного магнитного поля (ММП).

Суточные значения напряженности ММП  $B$ , а также других параметров солнечного ветра: скорости потока  $V_{sw}$ , плотности плазмы  $N_p$  и динамического давления  $P_{dyn}$ , а также их среднеквадратичных отклонений были заимствованы нами на сайте <http://omniweb.gsfc.nasa.gov>.

Чтобы охарактеризовать тесноту связи между различными параметрами, мы, как и авторы работы [15], применяли метод ранговой корреляции по Спирмену. Дело в том, что, как было показано ранее в ряде работ [см. напр., 6, 15], соотношение между амплитудой и спектральной плотностью УНЧ колебаний, скоростью солнечного ветра и потоками электронов не является линейным, ни одна из этих случайных величин не подчиняется нормальному распределению. Коэффициент ранговой корреляции (КРК) по Спирмену — это непараметрический метод, который используется с целью статистического изучения связи между случайными величинами с произвольным распределением [20]. Он определяет фактическую степень параллелизма между двумя количественными рядами величин. Практическое использование этого метода включает в себя присвоение каждому из признаков порядкового номера (ранга) по возрастанию (или убыванию) и

вычисление разности рангов каждой пары сопоставляемых значений. Затем вычисляется коэффициент корреляции  $r$  по формуле  $r = 1 - [6\sum d^2 / n(n^2 - 1)]$ , где  $\sum d^2$  — сумма квадратов разностей рангов, а  $n$  — число парных наблюдений. При использовании коэффициента ранговой корреляции условно оценивают тесноту связи между признаками, считая значения коэффициента менее 0.4 показателями слабой тесноты связи; значения более 0.4, но менее 0.7 — показателями умеренной тесноты связи, а значения 0.7 и более — показателями высокой тесноты связи.

### 3. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

**3.1. Связь основных параметров солнечного ветра с релятивистскими электронами в магнитосфере.** Различные модели динамики радиационных поясов [см., напр., 21–22] используют основные параметры солнечного ветра в качестве факторов, влияющих на вариации потоков заряженных частиц, релятивистских электронов, в частности. С учетом этого нам представляется важным проанализировать, как проявлялась связь между электронами на геосинхронной орбите и условиями в солнечном ветре в 23-м цикле солнечной активности. На рис. 1 показаны сглаженные вариации скорости солнечного ветра  $V_{sw}$ ,

плотности протонов межпланетной плазмы  $N_p$ , напряженности межпланетного магнитного поля  $B$ , динамического давления потока солнечной плазмы  $P_{\text{dyn}}$  и интенсивности потока электронов с энергией более 2 МэВ на геостационарной орбите. В качестве исходных взяты суточные значения межпланетных параметров по измерениям на спутниках *ACE* и *WIND* и суточные значения интегральной плотности потока электронов (флюенса) по данным геосинхронных аппаратов *GOES*. Сглаживание производилось путем скользящего усреднения по 365 точкам (годовое скользящее среднее). Для каждого параметра пунктиром показан тренд изменения за весь цикл. Отрезками вертикальных линий отмечены среднеквадратичные отклонения среднесуточных значений каждого из параметров, вычисленные за весь период. Серой утолщенной линией на рисунке построено скользящее среднее по 13 месячным значениям числа солнечных пятен  $W$ .

Как видно из рис. 1, вариации основных параметров солнечного ветра в 23-м цикле солнечной активности не отличаются существенно от таких вариаций в предыдущих циклах [23]. Максимум скорости солнечного ветра  $V_{\text{sw}}$  наблюдался на спаде солнечной активности в 2003–2004 гг., а минимум — в начале фазы роста в 1997 г. Плотность межпланетной плазмы  $N_p$  менялась в противофазе со скоростью солнечного ветра, причем коэффициент корреляции между двумя этими параметрами, усредненный за весь период, составлял  $-0.86$ , что говорит о высокой степени связи. Обращает на себя внимание большой общий тренд понижения плотности плазмы за весь период цикла. Он, однако, не превышает среднеквадратичного отклонения. Циклическая вариация напряженности межпланетного магнитного поля  $B$  имеет двугорбый вид. Основной, более поздний максимум  $B$  попал на начало спада солнечной активности на рубеже 2002–2003 гг. Сглаженное значение динамического давления солнечного ветра менялось в цикле слабо, если сравнивать его изменения со среднеквадратичным отклонением. Наконец, средний поток электронов менялся довольно значительно. Графики на рис. 1 показывают, что из всех параметров он существенно коррелирует лишь со скоростью солнечного ветра. Этот качественный вывод подтверждается и вычисленными коэффициентами корреляции. Они приведены в табл. 1, где показана квадратная матрица этих коэффициентов.

Видно, что динамическое давление совсем не коррелирует с потоком электронов; небольшая отрицательная корреляция с электронами наблюдается у напряженности ММП и несколько более высокая, но тоже отрицательная — у плотности солнечной плазмы. Корреляция со скоростью

**Таблица 1.** Коэффициенты ранговой корреляции между сглаженными значениями основных параметров солнечного ветра и интегральным потоком электронов

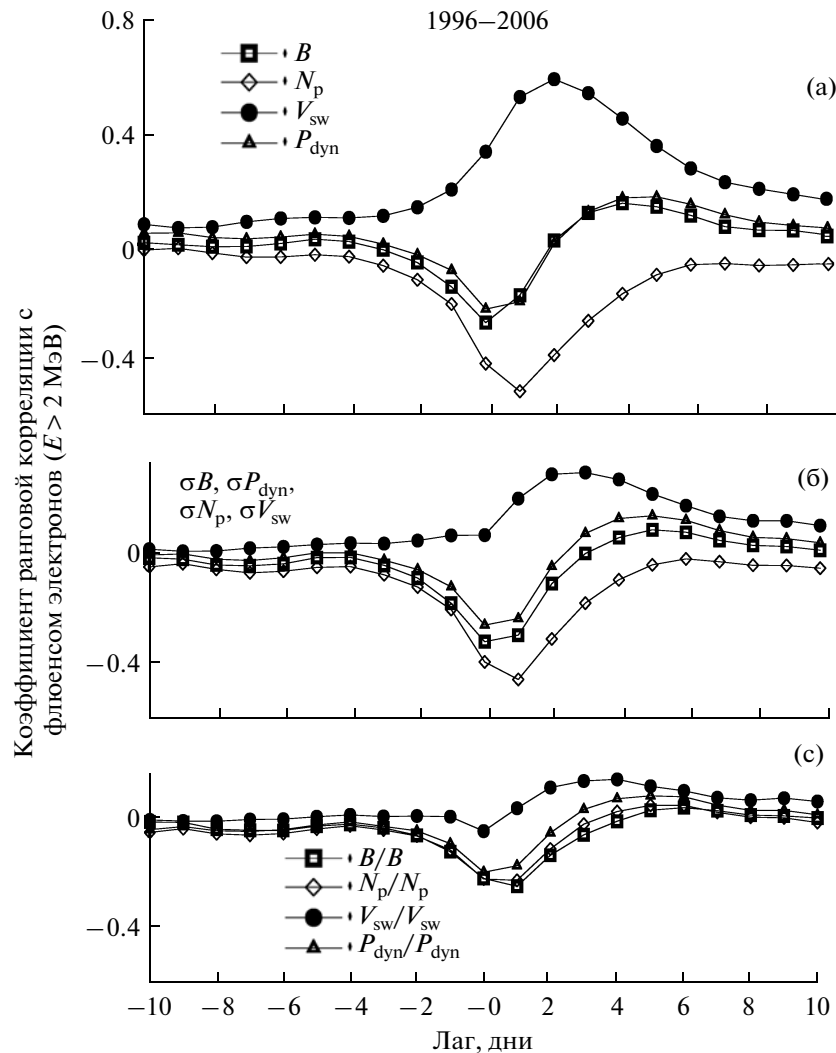
	$B$	$N_p$	$V_{\text{sw}}$	$P_{\text{dyn}}$	$J_{\text{el}}$
$B$	1.00	$-0.56$	0.49	0.02	$-0.22$
$N_p$	$-0.56$	1.00	$-0.86$	0.38	$-0.32$
$V_{\text{sw}}$	0.49	$-0.86$	1.00	$-0.12$	0.54
$P_{\text{dyn}}$	0.02	0.38	$-0.12$	1.00	0.06
$J_{\text{el}}$	$-0.22$	$-0.32$	0.54	0.06	1.00

солнечного ветра не слишком высокая ( $r = 0.54$ ), но вполне надежная, с надежностью более 99.9%.

Однако анализ связи сглаженных значений параметров солнечного ветра и потока электронов не дает полной картины и, тем более, не показывает динамики этой связи в цикле солнечной активности. Это особенно справедливо при использовании параметров межпланетной плазмы для разработки прогностических моделей усиления потоков релятивистских электронов. Для таких моделей важно знать, как меняются потоки частиц в ответ на резкие изменения обстановки в солнечном ветре в масштабе суток. При этом, в отличие от анализа корреляции сглаженных величин, необходимо учитывать запаздывание между вариациями параметров в солнечном ветре и их проявлениями в магнитосфере Земли. Чтобы найти величину этого запаздывания, мы вычислили коэффициент ранговой корреляции по Спирмену между временным рядом суточных значений флюенса релятивистских электронов и соответствующими рядами основных параметров солнечного ветра в зависимости от сдвига (лага) между рядами. Результат показан на рис. 2а. Здесь положительные значения лага соответствуют запаздыванию вариаций потока электронов относительно параметров солнечного ветра.

Приведенные кривые показывают, что коэффициент корреляции между скоростью солнечного ветра и потоком электронов имеет максимум ( $r \sim 0.6$ ) при сдвиге между этими параметрами, равном двум суткам. Этот результат полностью согласуется с результатами [15], полученными по данным измерений в 1990–2001 гг. Из других параметров лишь плотность протонов солнечного ветра проявляет заметную, но обратную связь с потоками электронов при коэффициенте корреляции  $-0.52$ , соответствующем опережению вариаций плотности в одни сутки по отношению к вариациям потока частиц на геосинхронной орбите.

Небольшой коэффициент ранговой корреляции электронных потоков с динамическим давлением солнечного ветра противоречит предположениям, высказываемым в работах [17, 24] о возбуждении УНЧ колебаний в магнитосфере Земли



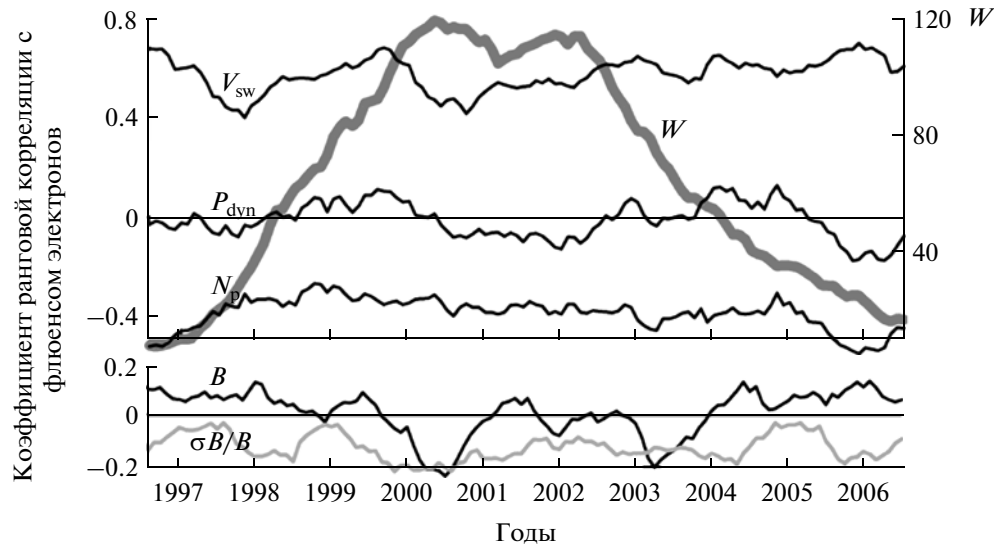
**Рис. 2.** Функции ранговой кросскорреляции между суточным флюенсом электронов и (а) основными параметрами СВ; (б) суточными среднеквадратичными отклонениями основных параметров СВ; (в) суточными среднеквадратичными отклонениями основных параметров СВ, нормированными на соответствующие значения этих параметров.

вариациями давления, оказываемого солнечным ветром на магнитопаузу, с последующим ускорением ими электронов радиационного пояса. С другой стороны, в работах [25–27] показана роль крупномасштабных альфеновских волн, а также флуктуаций плотности плазмы в солнечном ветре как источников магнитных возмущений. Чтобы более детально исследовать этот вопрос, мы построили на рис. 2б графики кросскорреляционных функций потоков электронов с вариациями не самих параметров солнечного ветра, а их стандартных отклонений  $\sigma$ :  $\sigma P_{dyn}$ ,  $\sigma B$ ,  $\sigma N_p$  и  $\sigma V_{sw}$ . В качестве последних были взяты значения, приведенные на сайте OMNI для суточных величин. Они вычисляются по среднечасовым значениям соответствующих параметров. Кроме того, мы вычислили кросскорреляционные функции потоков электронов и с относительными значениями

стандартных отклонений  $\sigma P_{dyn}/P_{dyn}$ ,  $\sigma B/B$ ,  $\sigma N_p/N_p$  и  $\sigma V_{sw}/V_{sw}$  (рис. 2в).

Как видно, среднеквадратичные отклонения, характеризующие изменчивость основных параметров солнечного ветра, слабо коррелируют с потоками электронов внутри магнитосферы. При этом по-прежнему несколько более тесную положительную связь с электронами демонстрирует изменчивость скорости солнечного ветра по сравнению с изменчивостью других параметров.

На рис. 3 показаны вариации в цикле солнечной активности коэффициентов ранговой корреляции с потоками релятивистских электронов основных параметров солнечного ветра: скорости  $V_{sw}$ , динамического давления  $P_{dyn}$ , плотности плазмы  $N$ , напряженности ММП  $B$ , а также относительной изменчивости ММП  $\sigma B/B$ . При подсчете коэффициентов корреляции данные по по-



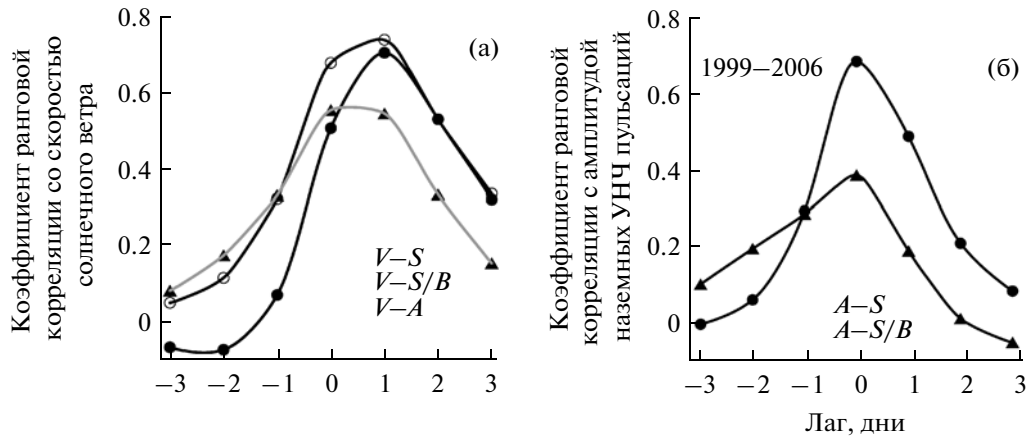
**Рис. 3.** Изменения в цикле солнечной активности КРК между суточным флюенсом электронов и среднесуточными значениями параметров СВ, взятыми с двухдневным опережением по отношению к потоку электронов.

токама электронов взяты с двухдневным запаздыванием по отношению к параметрам солнечного ветра. Здесь же приведен ход числа солнечных пятен. Все кривые построены методом скользящего усреднения по 13 месяцам. Этот рисунок подтверждает результаты, полученные выше. Корреляция потоков электронов со скоростью солнечного ветра является устойчивой на протяжении всего 23-го цикла. Из других параметров лишь плотность ионов межпланетной плазмы устойчиво антикоррелирует с потоками электронов в магнитосфере.

**3.2. Взаимная корреляция активности УНЧ волн в солнечном ветре, колебаний  $Pc5$  на поверхности Земли и скорости солнечного ветра.** Итак, мы убедились, что вариации скорости солнечного ветра тесно коррелируют с изменениями потоков релятивистских электронов внутри магнитосферы. Однако в литературе неизвестны механизмы, которые позволяли бы солнечному ветру непосредственно ускорять магнитосферные электроны. Необходим посредник, преобразующий энергию солнечного ветра в энергию электронов. Чаще всего в качестве такого посредника называют магнитосферные колебания в УНЧ диапазоне [8–9]. С одной стороны, разработаны механизмы ускорения электронов в электрическом поле низкочастотных волн посредством либо дрейфового резонанса [8, 10], либо за счет диффузии частиц с переносом их на внутренние магнитные оболочки [28]. С другой стороны, имеются многочисленные свидетельства тесной связи амплитуды и энергии наблюдаемых на поверхности Земли или в магнитосфере УНЧ колебаний со скоростью солнечного ветра [1–7]. В данном разделе мы рассмотрим, как проявлялась эта связь в 23-м цикле

солнечной активности. При этом, в отличие от предыдущих авторов, мы не будем ограничиваться внутримagnetосферными наблюдениями УНЧ, а включим в анализ также колебания, регистрируемые в солнечном ветре. Выше мы попытались, используя суточные значения среднеквадратичных отклонений параметров, найти связь с потоками электронов длиннопериодных вариаций межпланетной плазмы и ММП с характерными временами от часа до суток и обнаружили, что такая связь отсутствует. Здесь и далее мы снова будем использовать для оценки амплитуды среднесуточные значения среднеквадратичных отклонений, но взяв для их вычисления ряды магнитных измерений с высоким разрешением (одноминутные для наземных данных и данных КА *WIND* и 16-секундные для данных магнитометра КА *ACE*) и пропустив их предварительно через полосовой фильтр с частотами обрезания 1 и 5 мГц, то есть, выделив колебания примерно в диапазоне геомагнитных пульсаций  $Pc5$ . Кроме того, мы будем использовать суточные значения спектральной плотности этих колебаний в четырех частотных поддиапазонах.

Прежде всего мы вычислили кросскорреляционные функции между вариациями скорости СВ, с одной стороны, и амплитудой наземных и межпланетных УНЧ колебаний, с другой. Показанный на рис. 4а результат можно считать неожиданным: лишь нормированная амплитуда  $S/B$  УНЧ волн в солнечном ветре имеет максимум кросскорреляционной функции с  $V_{sw}$  при нулевом сдвиге между соответствующими временными рядами. Амплитуда же наземных колебаний  $A$  и ненормированная амплитуда межпланетных УНЧ волн  $S$  имеют наибольший коэффициент



**Рис. 4.** Функции ранговой кросскорреляции (а) скорости СВ с амплитудой  $A$  УНЧ колебаний на земле и нормированной  $S/B$  и ненормированной  $S$  амплитудой УНЧ волн в солнечном ветре (положительные значения лага соответствуют запаздыванию вариаций скорости СВ относительно вариаций УНЧ колебаний); (б) между амплитудами УНЧ колебаний на земле и в солнечном ветре (положительные значения лага соответствуют запаздыванию вариаций амплитуды наземных колебаний относительно межпланетных).

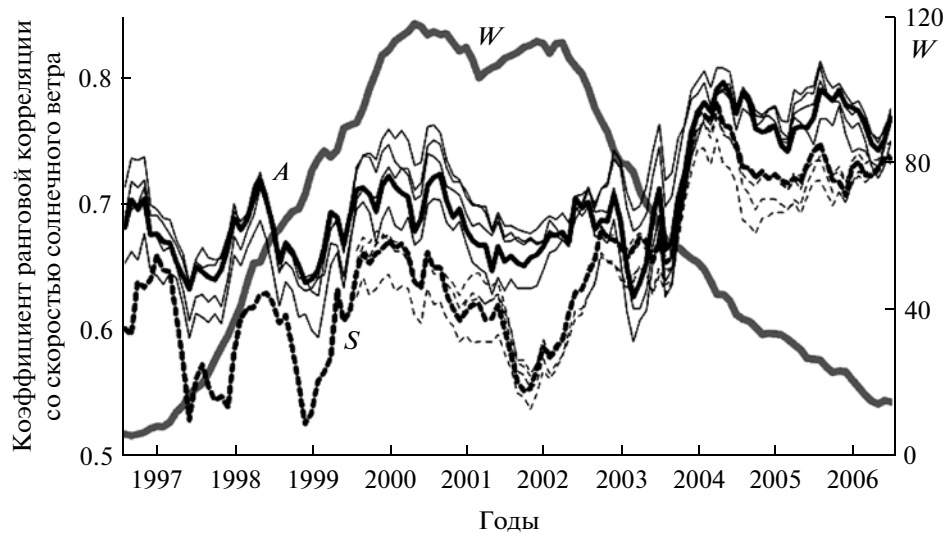
корреляции с  $V_{sw}$  при отставании вариаций скорости СВ на одни сутки. Получается, что текущие значения амплитуды и наземных, и внемагнитосферных колебаний лучше всего коррелируют с “завтрашними” значениями скорости солнечного ветра. Мы вернемся к обсуждению этого феномена в разделе 4. На рис. 4б показаны кросскорреляционные функции между амплитудой наземных  $Pc5$ , с одной стороны, и амплитудой (нормированной и ненормированной) УНЧ колебаний в солнечном ветре, с другой. Общие выводы, вытекающие из рассмотрения рис. 4а и б, следующие: (1) скорость СВ тесно связана с УНЧ активностью как в солнечном ветре, так и в магнитосфере; при этом вариации интенсивности колебаний опережают на сутки вариации скоро-

сти СВ; (2) амплитуда наземных и межпланетных УНЧ колебаний меняется синхронно, без временного сдвига между ними, по крайней мере, для среднесуточных значений; (3) нормированная на напряженность ММП амплитуда УНЧ волн в СВ слабее, чем ненормированная амплитуда коррелирует и со скоростью СВ, и с амплитудой наземных  $Pc5$ .

Количественные характеристики связей, проиллюстрированных рисунками 4а и 4б, можно видеть в табл. 2. Здесь приведена матрица коэффициентов взаимной ранговой корреляции суточных значений амплитуд и максимальной спектральной плотности наземных и межпланетных колебаний в четырех поддиапазонах (1–2 мГц, 2–3 мГц, 3–4 мГц и 4–5 мГц), обозначенных соответственно цифра-

**Таблица 2.** Коэффициенты взаимной ранговой корреляции за период 1999–2006 гг.

	$F_{gr1}$	$F_{gr2}$	$F_{gr3}$	$F_{gr4}$	$A$	$F_{s1}$	$F_{s2}$	$F_{s3}$	$F_{s4}$	$S$	$V_{sw}$ лаг = 0 д	$V_{sw}$ лаг = 1 д
$F_{gr1}$	1	0.95	0.93	0.91	0.94	0.70	0.70	0.71	0.70	0.71	0.59	0.72
$F_{gr2}$	0.95	1	0.97	0.94	0.94	0.69	0.69	0.70	0.69	0.71	0.65	0.75
$F_{gr3}$	0.93	0.97	1	0.97	0.93	0.70	0.71	0.71	0.71	0.72	0.64	0.76
$F_{gr4}$	0.91	0.94	0.97	1	0.91	0.70	0.71	0.71	0.70	0.71	0.61	0.75
$A$	0.94	0.94	0.93	0.91	1	0.67	0.68	0.68	0.68	0.72	0.68	0.74
$F_{s1}$	0.70	0.69	0.70	0.70	0.67	1	0.97	0.97	0.97	0.96	0.40	0.69
$F_{s2}$	0.70	0.69	0.71	0.71	0.68	0.97	1	0.98	0.98	0.96	0.43	0.70
$F_{s3}$	0.71	0.70	0.71	0.71	0.68	0.97	0.98	1	0.98	0.97	0.44	0.71
$F_{s4}$	0.70	0.69	0.71	0.70	0.68	0.97	0.98	0.98	1	0.97	0.45	0.71
$S$	0.71	0.71	0.72	0.71	0.72	0.96	0.96	0.97	0.97	1	0.51	0.70
$V_{sw}0$	0.59	0.65	0.64	0.61	0.68	0.40	0.43	0.44	0.45	0.50	1	0.77
$V_{sw}1$	0.72	0.75	0.76	0.75	0.74	0.69	0.70	0.71	0.71	0.70	0.77	1



**Рис. 5.** Изменения в цикле солнечной активности КРК запаздывающих на одни сутки значений скорости солнечного ветра с интенсивностью наземных  $A$  и межпланетных  $S$  УНЧ колебаний, а также со спектральными плотностями соответствующих колебаний. Серая линия — сглаженные вариации чисел Вольфа.

ми от 1 до 4, и двух рядов суточных значений скорости СВ: без временного сдвига (лаг = 0 дней) и с суточным запаздыванием (лаг = 1 день). Использовались данные за 1999–2006 гг.

Прежде всего, табл. 2 подтверждает предыдущий вывод о тесной связи УНЧ колебаний со скоростью солнечного ветра. И для межпланетных, и для наземных осцилляций связь с “завтрашними” значениями скорости СВ оказывается значительно более тесной, чем с одновременными величинами  $V_{sw}$ . Об этом ярко свидетельствует сравнение пары последних столбцов (или строк) табл. 2.

Интересные результаты дает сопоставление КРК между спектральной плотностью наземных и спутниковых измерений УНЧ в четырех поддиапазонах. Во-первых, как и следовало ожидать, исходя из шумового в среднем характера УНЧ, спектральные мощности в отдельных частотных полосах как для наземных, так и для межпланетных магнитных колебаний очень тесно коррелируют между собой со значениями КРК выше 0.9. При этом корреляция наземных колебаний слабее, чем внемагнитосферных. У последних значения КРК не опускаются ниже 0.97. Это может говорить о большей регулярности наземных УНЧ пульсаций. Далее, оценки интенсивности колебаний  $A$  и  $S$ , сделанные на основе среднеквадратичных отклонений, хорошо соответствуют оценкам спектральной плотности  $F_{gr1}$  и  $F_{si}$ . Опять же, в солнечном ветре КРК между  $S$  и  $F_{si}$  лежит в пределах 0.96–0.97, а между  $A$  и  $F_{gr1}$  — в пределах 0.91–0.94. По-видимому, внутри магнитосферы сказываются спектральные пики, обусловленные резонаторами.

Связь интенсивности  $A$  наземных колебаний с интенсивностью  $S$  колебаний в солнечном ветре оказывается несколько менее тесной, чем со скоростью СВ (0.72 и 0.74, соответственно). И наоборот, интенсивность  $S$  межпланетных осцилляций лучше коррелирует с наземной амплитудой  $A$ , чем со скоростью СВ (0.72 и 0.70, соответственно). (В обоих случаях имелась в виду “завтрашняя” скорость СВ.) Что касается перекрестных КРК между спектральными плотностями наземных  $F_{gr1}$  и межпланетных  $F_{si}$  колебаний, то прямого соответствия между интенсивностями пульсаций в одних и тех же частотных диапазонах не наблюдается. Например,  $F_{gr1}$  имеет наиболее высокий КРК не с  $F_{si}$ , а с  $F_{s3}$ , хотя различия минимальны. Но спектральные плотности всех поддиапазонов почти так же тесно коррелируют со скоростью СВ, как и оценки общей для всего диапазона Rc5 интенсивности  $A$  и  $S$ .

Посмотрим теперь, как меняется теснота связи рассмотренных выше параметров в цикле солнечной активности. На рис. 5 показаны вариации КРК в 23-м цикле между опережающим на сутки рядом значений скорости СВ и характеристиками наземных и внемагнитосферных УНЧ колебаний. Черными сплошными линиями показаны КРК, относящиеся к наземным пульсациям (утолщенная кривая — КРК  $V_{sw}$  с интенсивностью  $A$ , тонкие — КРК  $V_{sw}$  с оценками спектральной плотности  $F_{gr1}$ ), а штриховыми — коэффициенты ранговой корреляции  $V_{sw}$ , относящиеся к УНЧ в СВ (утолщенная кривая — КРК  $V_{sw}$  с интенсивностью  $S$ , тонкие штриховые линии — КРК  $V_{sw}$  с оценками спектральной плотности  $F_{si}$ ). Видно, что назем-



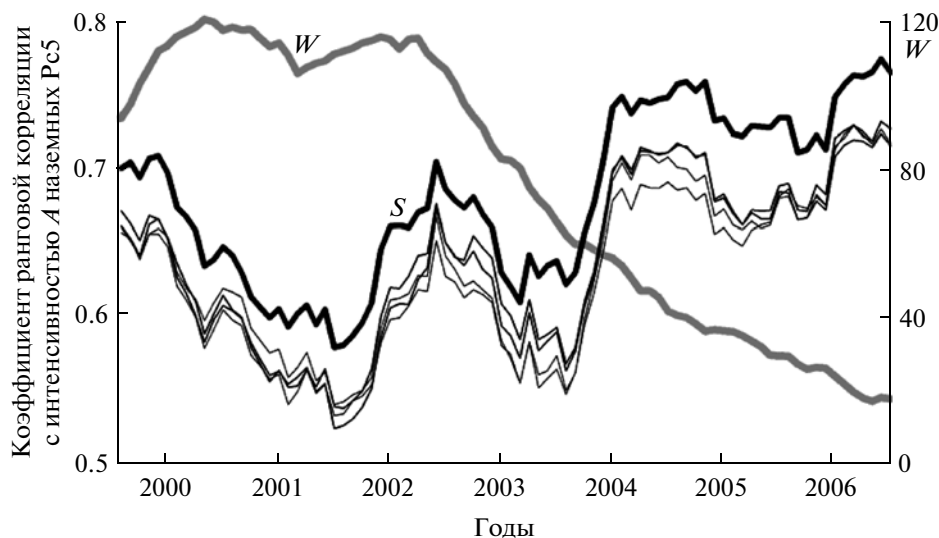


Рис. 6. Вариации КРК между наземными УНЧ пульсациями и характеристиками колебаний в СВ: амплитудой  $S$  и спектральной плотностью.

ные колебания в среднем несколько теснее связаны со скоростью СВ, нежели те, которые наблюдаются непосредственно в самом солнечном ветре. В целом значения КРК менялись в течение цикла не слишком сильно: для амплитуд наземных пульсаций диапазон изменений КРК с  $V_{sw}$  составил 0.63–0.80, а для колебаний в солнечном ветре – 0.53–0.79. Однако изменения происходили достаточно резко, если учесть, что приведены бегущие средние по 13 месяцам. Связь оценок спектральных плотностей в отдельных поддиапазонах со скоростью СВ в среднем менее тесная, чем интенсивности колебаний во всем диапазоне 1–5 мГц, как для наземных, так и для межпланетных колебаний.

Циклический ход корреляций  $V_{sw}-A$  и  $V_{sw}-S$  не слишком выражен, если не считать заметного

подъема уровня связей во второй половине фазы спада. Имеется также пик корреляции в середине фазы подъема в 1998 г. и подъем во время первого максимума солнечной активности в 1999–2000 гг. В целом эти закономерности согласуются с результатами, полученными в работе [15] по данным 1990–2001 гг. Связь наземных и межпланетных колебаний со скоростью СВ в цикле менялась в целом синфазно. Более подробно изменения связи между этими колебаниями для периода 1999–2006 гг. проиллюстрированы рис. 6, где показаны вариации КРК между амплитудой наземных пульсаций  $A$  и характеристиками межпланетных колебаний.

Видно, что амплитуда УНЧ колебаний на земле устойчиво коррелирует с амплитудой УНЧ волн в солнечном ветре, КРК между ними не падает ниже 0.58 при максимальном значении 0.77. Значения КРК амплитуды  $A$  наземных пульсаций с оценками спектральной плотности межпланетных УНЧ волн в различных поддиапазонах несколько ниже, они не превышают 0.73 при минимальном значении 0.52. Наиболее тесно колебания в двух средах были связаны во второй половине фазы спада солнечного цикла.

**3.3. Отклик потоков релятивистских электронов на усиление активности наземных и межпланетных УНЧ колебаний.** Перейдем теперь к анализу связи УНЧ колебаний, наблюдаемых как в солнечном ветре, так и на земле, с вариациями потоков релятивистских электронов, регистрируемых на геосинхронной орбите.

На рис. 7 представлены кросскорреляционные функции (ранговая корреляция) между суточными значениями флюенса электронов  $J_{el}$  и амплитудой магнитных УНЧ флуктуаций в солнечном ветре, нормированной и ненормированной на

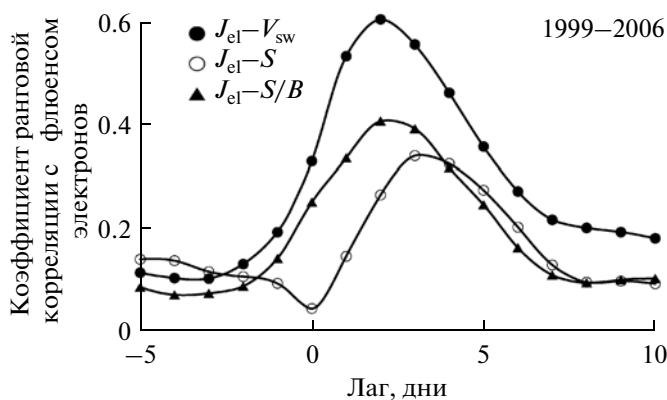


Рис. 7. Функции ранговой кросскорреляции между суточным флюенсом электронов  $J_{el}$  и интенсивностью  $S/B$  и  $S$  УНЧ колебаний.

модуль напряженности ММП ( $S/B$  и  $S$ , соответственно). Для сравнения приведена также кривая кросскорреляционной функции потоков электронов со скоростью солнечного ветра  $V_{sw}$ . Мы видим, что хотя максимальные значения коэффициентов ранговой корреляции электронов с интенсивностью УНЧ в солнечном ветре меньше, чем со скоростью солнечного ветра, они значительно выше, чем с длиннопериодными флуктуациями ММП (рис. 2а и 2б). При этом, в отличие от длиннопериодных вариаций, нормированная интенсивность УНЧ лучше ненормированной коррелирует с потоками электронов. Максимум корреляции наблюдается при запаздывании вариаций электронов относительно УНЧ на 2–3 суток.

В табл. 3 приведены коэффициенты ранговой корреляции интенсивности УНЧ колебаний  $S$  и  $S/B$  в солнечном ветре с потоками релятивистских электронов  $J_{el}$  в магнитосфере за период 1999–2006 гг. Значения коэффициентов подсчитаны для запаздывания вариаций электронных потоков относительно УНЧ, равного двум (слева) и трем (справа) суткам.

Рис. 8 показывает изменения коэффициентов ранговой корреляции интенсивности УНЧ в солнечном ветре с потоками электронов в магнитосфере в цикле солнечной активности. Как и на рис. 3, суточные данные по потокам электронов взяты с двухдневным запаздыванием. Видно, что связь интенсивности УНЧ за пределами магнитосферы с релятивистскими электронами на геосинхронной орбите не столь устойчива, как в случае скорости солнечного ветра. Имеется провал в 1997–1998 гг., который, впрочем, может быть связан с тем, что до 1999 г. использовались данные магнитометров двух КА: *ACE* и *WIND*, в то время как начиная с 1999 г. были использованы данные только одного КА *ACE*. В целом кривая корреля-

Таблица 3

Лаг = 2 дня					Лаг = 3 дня				
	$V_{sw}$	$S$	$S/B$	$J_{el}$		$V_{sw}$	$S$	$S/B$	$J_{el}$
$V_{sw}$	1.00	0.51	0.55	0.60	$V_{sw}$	1.00	0.51	0.55	0.55
$S$	0.51	1.00	0.65	0.26	$S$	0.51	1.00	0.65	0.33
$S/B$	0.55	0.65	1.00	0.40	$S/B$	0.55	0.65	1.00	0.37
$J_{el}$	0.60	0.26	0.40	1.00	$J_{el}$	0.55	0.33	0.37	1.00

ции УНЧ с электронами следует за кривой связи скорости солнечного ветра с электронами, но значения коэффициентов корреляции существенно ниже. При этом нормированная на напряженность ММП интенсивность УНЧ теснее, чем ненормированная связана с электронами.

Итак, корреляция измеренных магнитометром *ACE* УНЧ колебаний в солнечном ветре с вариациями потоков электронов на геосинхронной орбите оказалась умеренной, максимум связи достигается при двухдневном запаздывании электронов относительно нормированных амплитуд межпланетных осцилляций и при трехдневном запаздывании относительно ненормированных на напряженность ММП колебаний (рис. 7 и табл. 3). Рассмотрим теперь, как связаны потоки релятивистских электронов с наземными пульсациями.

На рис. 9 показаны функции ранговой кросс-корреляции флюенса потока релятивистских ( $E > 2$  МэВ) электронов с интенсивностью  $A$  и спектральными плотностями  $F_{gr}$  наземных пульсаций за весь период 1996–2006 гг. Для сравнения приведена также кросскорреляционная функция скорости СВ с электронами. Видно, что наивысшая корреляция как амплитуды во всем диапазоне 1–5 мГц, так и спектральной плотности в отдельных поддиапазонах достигается при опере-

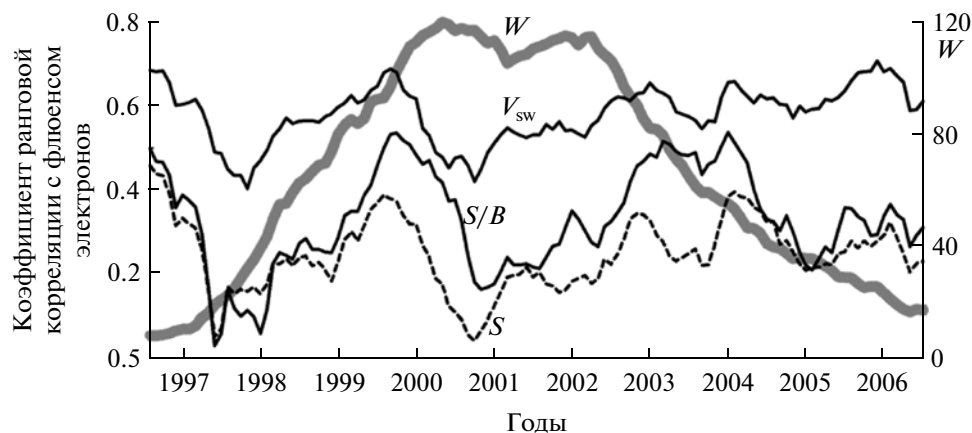
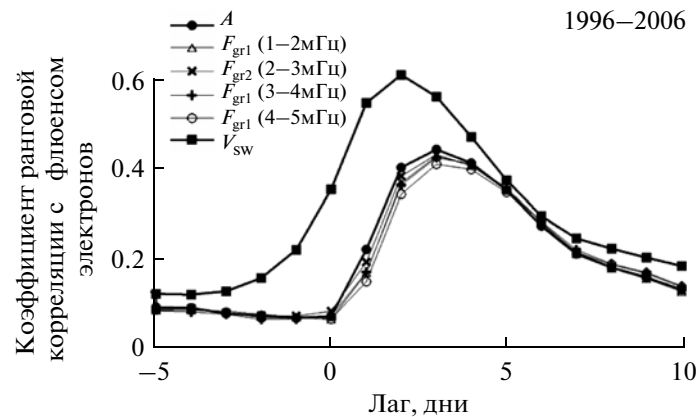
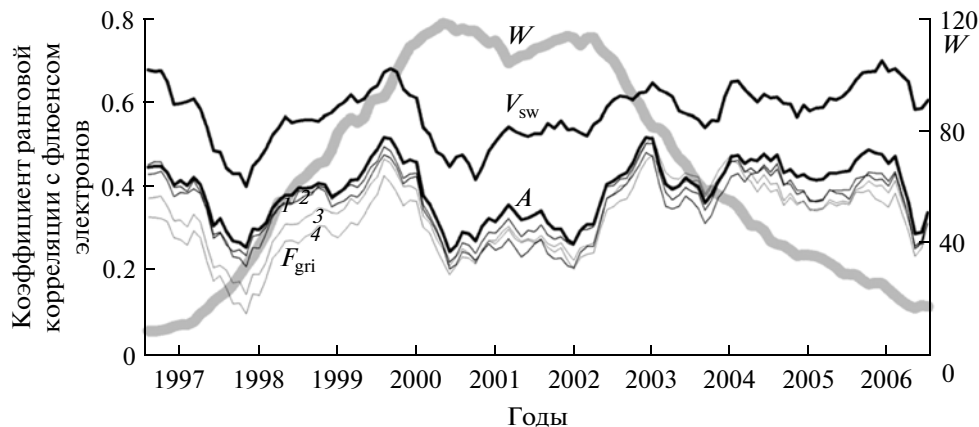


Рис. 8. Изменения в солнечном цикле КРК между суточным флюенсом электронов и среднесуточной интенсивностью УНЧ колебаний в СВ, взятой с двухдневным опережением по отношению к потоку электронов.



**Рис. 9.** Функции ранговой кросскорреляции между суточным флюенсом электронов  $J_{el}$  и интенсивностью  $A$  и спектральной плотностью  $F_{gri}$  наземных УНЧ колебаний.



**Рис. 10.** Вариации в солнечном цикле КРК интенсивности  $A$  и спектральной плотности  $F_{gri}$  наземных УНЧ колебаний с флюенсом электронов. Временной ряд флюенса электронов взят запаздывающим на трое суток по отношению к  $A$  и на двое суток по отношению к  $V_{sw}$ .

жении временного ряда УНЧ по отношению к ряду флюенса электронов на трое суток. Коэффициент корреляции ( $r = 0.42$ ) примерно равен коэффициенту корреляции нормированной амплитуды УНЧ колебаний в солнечном ветре с электронами. Уровень корреляции спектральной плотности в отдельных поддиапазонах несколько ниже. Самый высокий коэффициент корреляции (при лаге, равном 3 дням) у спектральной плотности в интервале частот 2–3 МГц ( $r = 0.41$ ), самый низкий – в интервале 4–5 МГц ( $r = 0.39$ ).

На рис. 10 показан циклический ход коэффициентов ранговой корреляции с электронами амплитуды  $A$  наземных пульсаций и их спектральной плотности  $F_{gri}$ . Видно, что так же, как и для амплитуды  $S$  межпланетных колебаний (рис. 8), КРК наземных пульсаций следит за КРК между скоростью СВ и флюенсом релятивистских электронов, оставаясь постоянно ниже последнего. Величина коэффициента корреляции наземных

Рс5 с электронами лежит в диапазоне между 0.25 и 0.52 при среднем значении около 0.4. Отчетливо заметно падение уровня связи в максимуме солнечной активности и подъемы в конце фазы роста и в начале фазы спада. Есть также провал в конце 1997 г., но он намного слабее, чем аналогичный провал для корреляции между УНЧ волнами в СВ и потоками электронов (рис. 8).

**4. Обсуждение полученных результатов.** В первую очередь следует отметить, что выбранный нами для анализа период 23-го цикла, хотя и охватывает 11-летний интервал, но не включает в себя три завершающих года цикла, с 2007-го по 2009-й. Сделано это сознательно, поскольку эти годы самого глубокого спада как солнечной, так и геомагнитной активности, не являются типичными для периодов минимума и должны исследоваться отдельно.

Рис. 1, показывающий общий ход изменения smoothed характеристик солнечного ветра и

потоков релятивистских электронов на геосинхронной орбите, а также табл. 1, содержащая коэффициенты взаимной корреляции между ними, сразу определяют основной параметр, влияющий на вариации населенности внешнего радиационного пояса энергичными электронами. Им, конечно, является скорость солнечного ветра. Роль других параметров минимальна. Несколько неожиданным можно назвать полное отсутствие корреляции динамического давления СВ  $P_{\text{dyn}}$  с потоками электронов  $J_{\text{el}}$ , поскольку ряд авторов связывал генерацию УНЧ колебаний в магнитосфере со скачками напора солнечного ветра на магнитопаузу. Чисто математически отсутствие корреляции объясняется тем, что  $P_{\text{dyn}}$  пропорционально произведению квадрата скорости СВ  $V_{\text{sw}}$  на плотность плазмы  $N_p$  в потоке, но первый из этих параметров имеет положительную, а второй — отрицательную корреляцию с электронами. Что касается отрицательной корреляции  $N_p$  с  $J_{\text{el}}$ , то математически она вытекает из высокой отрицательной корреляции  $N_p$  с  $V_{\text{sw}}$ , но некоторые авторы считают плотность плазмы важным параметром для развития неустойчивости Кельвина—Гельмгольца (КГ) на магнитопаузе [6], поэтому позже мы вернемся к роли  $N_p$ .

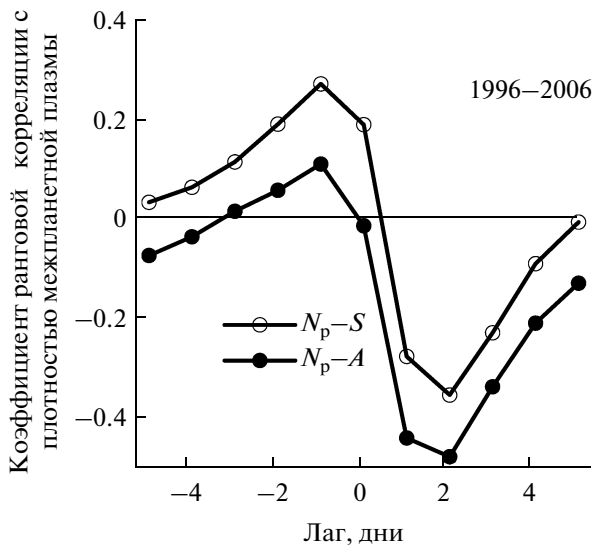
Рис. 2а дает важную информацию о временных сдвигах между вариациями параметров солнечного ветра и  $J_{\text{el}}$ . Двухдневное запаздывание усиления потоков электронов после повышения скорости СВ отмечалось и ранее другими авторами [15], но суточный сдвиг реакции электронов на понижение плотности межпланетной плазмы является новым фактом. Рис. 2б и 2в ясно показывают, что интенсивность колебаний параметров солнечного ветра с масштабом времени от часа до суток практически никак не влияет на заселенность внешнего радиационного пояса релятивистскими электронами. Важно, что все отмеченные закономерности устойчиво сохраняются на протяжении всего цикла (рис. 3), испытывая небольшие вариации. Так, корреляция между скоростью СВ и потоками электронов достигает наибольших значений в минимуме солнечной активности в 1996 г., в конце фазы роста (на исходе 1999 г.) и на последней стадии фазы спада в 2005 г. Как выявленные тенденции циклического хода КРК между  $V_{\text{sw}}$  и  $J_{\text{el}}$ , так и его значения (в период перекрытия анализируемых интервалов с 1996 по 2001 гг.) в целом согласуются с результатами работы [15].

В этой же работе, вслед за статьей [6], была показана высокая корреляция спектральной плотности наземных УНЧ колебаний в диапазоне 1–10 мГц с запаздывающими на сутки значениями скорости СВ. Однако в работе [15] коэффициент корреляции с одновременными значениями скорости был все же выше, чем с запаздывающими (“завтрашними”) в отличие от наших результа-

тов, показанных на рис. 4а и в табл. 3. Возможно, это объясняется различием в методе обработки данных наземных магнитных наблюдений или различием в свойствах солнечного ветра, характерных для двух анализируемых периодов: 1990–2001 гг. в статье [15] и 1999–2006 гг. в нашей работе. По крайней мере, для интервала 1996–2001 гг. различие в коэффициентах корреляции между УНЧ колебаниями и скоростью СВ при лаге, равном нулю и одним суткам, было существенно меньше, чем для всего интервала 1996–2006 гг.

Нет ничего удивительного в высокой корреляции УНЧ активности в межпланетной среде с запаздывающими на сутки значениями скорости солнечного ветра, если учесть, что основной вклад в корреляцию дают высокоскоростные потоки СВ. Это всего лишь говорит о том, что резкие усиления амплитуды УНЧ волн не привязаны к пику скорости потока, а переносятся его передним фронтом. Но как объяснить усиление амплитуды колебаний на земле, одновременное с всплеском волновой активности в СВ и опережающее на сутки максимум скорости потока? Ведь считается [напр., 29, 30], что внутримангнитосферные колебания имеют своим источником неустойчивость Кельвина—Гельмгольца (КГ) на магнитопаузе, которая развивается при наиболее высоких скоростях обтекания магнитосферы. Engebretson et al. [6] пытаются объяснить раннее развитие КГ неустойчивости ролью плотности плазмы в СВ. Они утверждают, что для типичного высокоскоростного потока СВ характерно резкое кратковременное повышение плотности плазмы примерно за двое суток до пика скорости потока (см. [6], рис. 14). За счет этого пик инкремента неустойчивости КГ наступает на 0.5–1 сутки раньше максимума скорости обтекания. Если предположение этих авторов верно, то должна иметься положительная корреляция между вариациями амплитуды наземных Рс5 и вариациями плотности межпланетной плазмы, причем вариации плотности должны на сутки опережать изменения амплитуды колебаний. Мы проверили наличие ожидаемой связи на нашем материале.

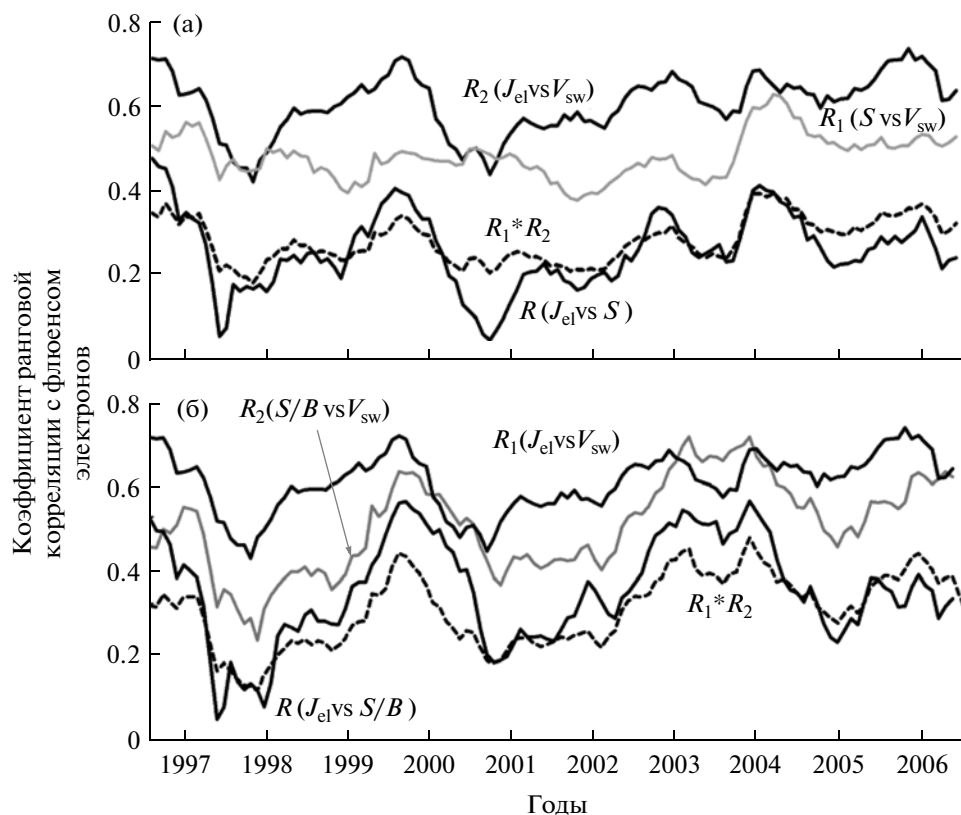
Результат показан на рис. 11. Видно, что действительно, при лаге, равном –1 суткам, имеется пик положительной корреляции между наземной амплитудой  $A$  и плотностью  $N_p$ . Но, во-первых, значение коэффициента корреляции в пике очень мало (меньше 0.1), а во-вторых, и это самое существенное, гораздо больший (но тоже незначительный) пик положительной корреляции имеется и на графике кросскорреляционной функции  $N_p$  с амплитудой  $S$  УНЧ колебаний в солнечном ветре. Ясно, что эти колебания никакого отношения к неустойчивости КГ на магнитопаузе не имеют. Нам представляется, что опережающее усиление наземной активности УНЧ



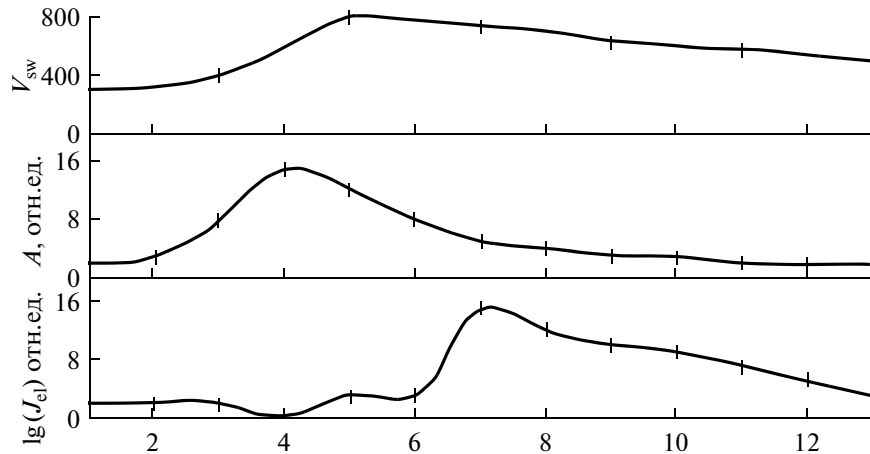
**Рис. 11.** Кросскорреляционные функции между вариациями плотности плазмы  $N_p$  солнечного ветра и амплитудой межпланетных  $S$  и наземных  $A$  УНЧ колебаний.

имеет другое, более естественное объяснение, не связанное с КГ неустойчивостью. Его подсказывает рис. 4б, иллюстрирующий высокую корреля-

цию наземных и межпланетных УНЧ колебаний. Убеждает не только высокий коэффициент корреляции (0.72), но и острый пик кросскорреляционной функции при нулевом лаге между  $A$  и  $S$ , показывающий, что колебания в двух средах развиваются строго одновременно. По-видимому, основным источником магнитосферных колебаний являются проникающие из солнечного ветра УНЧ волны. Механизмы проникновения предлагались в ряде работ [31, 32]. При этом неустойчивость КГ, а возможно, и комбинированная неустойчивость Кельвина–Гельмгольца–Релея–Тейлора (см. [33–35]) могут играть роль усилителя падающих на магнитопаузу УНЧ волн. Внутри магнитосферы спектр колебаний подвергается модификации благодаря наличию разного рода магнитосферных резонансов, основными из которых, видимо, являются резонансы силовых линий (field-line resonances). Этим объясняется отсутствие прямого соответствия спектра между волнами в солнечном ветре и колебаниями на Земле (табл. 2). Тем не менее, как показано в работе [36], в особых условиях глубокого минимума солнечной и магнитной активности возможно прямое проникновение УНЧ волн из СВ в магнитосферу с сохранением спектра.



**Рис. 12.** Вариации в солнечном цикле коэффициентов ранговой корреляции  $R$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  и произведения  $R_1 R_2$  (см. текст) (а) для ненормированной интенсивности волн в СВ, (б) для нормированной на напряженность ММП интенсивности.



**Рис. 13.** Модельные временные профили скорости СВ  $V_{sw}$ , амплитуды наземных колебаний  $A$  и флюенса электронов  $J_{el}$ , типичные для прихода к Земле высокоскоростного потока СВ. Профиль скорости СВ аналогичен использованному в работе [6].

На рис. 7 и 8, где показана связь потоков релятивистских электронов в магнитосфере с УНЧ волнами в солнечном ветре, обращает на себя внимание лучшая корреляция с электронами нормированной на модуль ММП амплитуды УНЧ волн  $S/B$  по сравнению с ненормированной амплитудой  $S$ . Превышение КРК  $J_{el} - S/B$  над КРК  $J_{el} - S$  сохраняется при запаздывании вариаций электронов относительно вариаций межпланетных УНЧ и на два, и на три дня, а также на протяжении всего цикла за исключением короткого промежутка в конце 1997-го – самом начале 1998-го годов. На наш взгляд, это может говорить о возможной роли УНЧ турбулентности солнечного ветра в передаче энергии СВ в магнитосферу Земли и последующем участии этой энергии в процессах ускорения электронов. Такое предположение основывается на том, что отношение  $S/B$  прямо отражает уровень турбулентности межпланетной плазмы в диапазоне УНЧ, в отличие от амплитуды  $S$ , которая отражает интенсивность волн безотносительно к напряженности фонового магнитного поля. Высокая интенсивность колебаний на фоне сильного квазистационарного магнитного поля еще не дает высокого уровня турбулентности. В этой связи можно упомянуть работу [37], где обсуждается возможность возбуждения колебаний в магнитосфере механизмом, аналогичным механизму Милза–Филлипса (Milse–Phillips), для которого турбулентность обтекающего потока играет решающую роль.

На первый взгляд из рассмотрения рис. 8 может сложиться впечатление, что связь УНЧ колебаний в солнечном ветре с электронами в магнитосфере является целиком следствием корреляции интенсивности УНЧ со скоростью солнечного ветра, которая, в свою очередь, коррелирует с потоками электронов. Проанализиру-

ем, однако, этот вопрос детальнее. Идея состоит в том, что если связь УНЧ колебаний с потоками электронов осуществляется исключительно за счет цепочки “интенсивность  $S$  УНЧ волн – скорость  $V_{sw}$  солнечного ветра – флюенс  $J_{el}$  потока электронов”, то произведение коэффициента корреляции  $R_1$  между  $S$  и  $V_{sw}$  на коэффициент корреляции  $R_2$  между  $V_{sw}$  и  $J_{el}$  должно дать примерно коэффициент корреляции  $R$  между  $S$  и  $J_{el}$ . То же касается нормированной интенсивности УНЧ волн  $S/B$ . На рис. 12а показаны вариации в 23-м цикле всех перечисленных коэффициентов корреляции для ненормированной интенсивности УНЧ  $S$ , а на рис. 12б – для нормированной интенсивности  $S/B$ . Кроме того, на каждом рисунке изображена кривая произведения  $R_1 R_2$ . Получившаяся картина существенно отличается на двух рисунках. Если на рис. 12а мы видим почти полное совпадение уровней коэффициента  $R$  и произведения  $R_1 R_2$ , то на рис. 12б коэффициент ранговой корреляции  $R$ , вычисленный непосредственно из сопоставления рядов значений флюенса электронов  $J_{el}$  и нормированной интенсивности УНЧ  $S/B$ , превышает произведение  $R_1 R_2$  на большей части анализируемого интервала, за исключением коротких периодов второй половины 1997–начала 1998 гг., конца 2000–начала 2001 гг. и заключительной стадии фазы спада солнечной активности, начиная со второй половины 2004 г., когда уровни сравниваемых величин были примерно равны или значение  $R_1 R_2$  несколько превышало  $R$ . В целом среднее значение  $R$  составило 0.33, а  $R_1 R_2 - 0.28$ . Таким образом, проведенный качественный анализ показывает, что уровень УНЧ турбулентности в солнечном ветре и сам по себе, безотносительно его связи со скоростью солнечного ветра, коррелирует с потоками элек-

тронов в магнитосфере, пусть эта связь и значительно слабее, чем корреляция между  $V_{sw}$  и  $J_{el}$ .

В заключение обсудим вопрос, который возникает у читателя при чтении всех статей, посвященных связи релятивистских электронов в магнитосфере со скоростью солнечного ветра и с интенсивностью внутримангнитосферных УНЧ колебаний. Почему корреляция электронов со скоростью СВ неизменно оказывается более высокой, нежели с амплитудой (или спектральной мощностью) магнитосферных УНЧ? Ведь если непосредственным агентом, вызывающим ускорение электронов до релятивистских скоростей, являются УНЧ колебания, а солнечный ветер лишь раскачивает их, то и корреляция потоков электронов с УНЧ должна быть выше, чем со скоростью потока. Наше предположение о том, что непосредственным источником осцилляций в магнитосфере являются УНЧ волны в солнечном ветре, не снимает вопроса. Авторы работы [15], обсуждая эту проблему, предлагают несколько возможных вариантов: необходимость достаточно длительной генерации УНЧ колебаний для эффективного ускорения электронов, поэтому короткие события не будут коррелировать с потоками электронов; необходимость наличия затравочных частиц — электронов средних энергий порядка сотен кэВ, которые появляются во время суббуревых возмущений, более интенсивных при высоких скоростях СВ; существование неких других механизмов ускорения электронов, не связанных с УНЧ, но коррелирующих со скоростью СВ. Не отрицая вероятности вклада всех этих факторов, заметим, что, возможно, самой важной причиной, по которой коэффициент корреляции между  $V_{sw}$  и  $J_{el}$  превышает коэффициент корреляции между амплитудой УНЧ  $A$  и флюенсом электронов  $J_{el}$  является просто тот случайный факт, что временной профиль  $V_{sw}$  для типичного высокоскоростного потока подобен временному профилю  $J_{el}$ , хотя формируются эти профили совершенно разными механизмами. Вариация скорости СВ определяется, по-видимому, солнечным источником потока и его эволюцией во время распространения до орбиты Земли, в то время как профиль флюенса релятивистских электронов определяется временной зависимостью баланса источников и стоков (потерь) популяции энергичных электронов во внешнем радиационном поясе. Взаимодействие УНЧ волн с частицами обеспечивает источник, но сток определяют другие механизмы, в частности, ОНЧ эмиссии, что ограничивает уровень корреляции между  $A$  и  $J_{el}$ . В то же время, в типичном высокоскоростном потоке СВ скорость нарастает обычно в течение двух-трех суток (причем в первые сутки наблюдается максимально высокая активность УНЧ колебаний, но в целом УНЧ волны активны не более

двух суток), и постепенно спадает в последующие пять-шесть суток (см. [6], рис. 14), что примерно совпадает (чисто случайно!) с типичным временем релаксации потоков релятивистских электронов в магнитосфере Земли. Поскольку основной вклад во взаимную корреляцию трех этих параметров  $V_{sw}$ ,  $A$  и  $J_{el}$  вносят высокоскоростные потоки СВ, мы имеем высокую корреляцию электронов с  $V_{sw}$  и существенно более низкую с  $A$ . Так, для показанных на рис. 13 модельных профилей  $V_{sw}$ ,  $A$  и  $J_{el}$  коэффициент корреляции между скоростью солнечного ветра  $V_{sw}$  и флюенсом релятивистских электронов  $J_{el}$  с двухсуточным запаздыванием составляет 0.82, а между амплитудой  $A$  и флюенсом  $J_{el}$  с трехсуточным запаздыванием — только 0.72.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Анализ, выполненный в данной статье, подтвердил наличие достаточно тесной связи на протяжении всего 23-го цикла солнечной активности между суточными значениями скорости солнечного ветра и суточным флюенсом электронов с энергией более 2 МэВ по измерениям на геосинхронной орбите. Коэффициенты ранговой корреляции между этими параметрами, подсчитанные за 13-месячные скользящие интервалы, лежат в пределах от 0.40 на фазе роста солнечной активности до 0.71 в конце фазы спада при общем значении за весь цикл (1996–2006 гг.), равном 0.59. Все эти значения подсчитаны при двухсуточном запаздывании вариаций флюенса относительно вариаций скорости СВ. Полученное максимальное значение 13-месячного коэффициента ранговой корреляции  $V_{sw} - J_{el}$  несколько ниже максимального годового его значения (~0.8), полученного в работе [15] для поздней фазы спада 22-го цикла.

Подтверждена тесная связь скорости солнечного ветра с интенсивностью наземных УНЧ колебаний (КРК за 1996–2006 гг. равен 0.73), и выявлена почти такая же тесная связь скорости СВ с межпланетными УНЧ волнами в солнечном ветре (КРК за 1999–2006 гг. равен 0.70). В отличие от результатов предыдущих работ других авторов, максимум кросскорреляционной функции достигается при запаздывании на сутки вариаций скорости солнечного ветра относительно вариаций амплитуды как наземных, так и межпланетных колебаний. 13-месячные коэффициенты ранговой корреляции между  $V_{sw}$  и  $A$  и между  $V_{sw}$  и  $S$  максимальны во второй половине фазы спада 23-го цикла, достигая в этот период значений 0.75–0.80. Устойчивая корреляция УНЧ волн со скоростью СВ сохраняется и на других фазах цикла, не падая ниже 0.53 для пары  $V_{sw} - S$  и 0.63 для пары  $V_{sw} - A$ . Высокая корреляция наблюдается и между интенсивностью наземных и межпланетных УНЧ колебаний, КРК меняется от ~0.6 в мак-

симуле цикла до 0.78 в конце фазы спада. Кросс-корреляционная функция имеет максимум при нулевом лаге.

На основе этих результатов мы делаем вывод, что основным, первичным источником магнитосферных УНЧ колебаний являются УНЧ волны солнечного ветра, неустойчивость Кельвина-Гельмгольца лишь усиливает падающие на магнитопазу колебания, а магнитосфера играет роль активного фильтра, модифицируя спектр осцилляций.

Рассмотрена также связь межпланетных и наземных колебаний частотного диапазона Pc5 с вариациями потоков релятивистских электронов. Эта связь оказывается существенно слабее, чем корреляция скорости солнечного ветра с флюенсом электронов. Тем не менее, она имеется и сохраняется на всем протяжении цикла. Важным обстоятельством является превышение коэффициента ранговой корреляции нормированной на модуль ММП амплитуды межпланетных УНЧ волн с электронами над КРК между ненормированной амплитудой и флюенсом электронов. Мы объясняем это ролью турбулентности солнечного ветра с временным масштабом, сопоставимым с периодами УНЧ волн (от единиц до десятков минут). Наземные УНЧ колебания коррелируют с потоками релятивистских электронов ненамного более тесно, чем межпланетные, но более устойчиво. Значение КРК в основном держится около среднего значения 0.4, лишь изредка опускаясь ниже 0.3. Максимальные значения КРК (чуть выше 0.5) наблюдаются как для межпланетных, так и для наземных колебаний в конце фазы роста и в начале фазы спада.

Менее тесную корреляцию энергичных электронов с УНЧ колебаниями по сравнению с корреляцией электронов со скоростью СВ мы объясняем сильным отличием временного профиля интенсивности электронных потоков от профиля амплитуды УНЧ. Это связано с большим характерным временем релаксации популяции релятивистских электронов во внешнем радиационном поясе (около недели) и сравнительно небольшой длительностью активизации межпланетных и наземных УНЧ колебаний, в основном сосредоточенной на переднем фронте высокоскоростного потока СВ. В то же время, задний фронт высокоскоростного потока обычно простирается на огромные расстояния, по времени занимая 5–6 дней, что и обеспечивает высокую корреляцию скорости СВ с электронными потоками.

Подводя итоги, перечислим новые положения, сформулированные в результате проведенного в работе анализа:

1. Выявлен четкий максимум кросс-корреляционной функции между вариациями скорости солнечного ветра и активности УНЧ колебаний, как наземных, так и межпланетных, при суточном запаздывании значений скорости СВ.

2. Обнаружена тесная связь между одновременными рядами амплитуды наземных и межпланетных УНЧ колебаний.

3. Показано, что вариации амплитуды УНЧ волн в солнечном ветре и УНЧ колебаний (Pc5) на земле имеют примерно одинаковый коэффициент корреляции с запаздывающим на трое суток флюенсом потоков релятивистских электронов на геосинхронной орбите. При этом нормированная на напряженность ММП амплитуда УНЧ волн имеет больший коэффициент корреляции с электронами, чем ненормированная. В связи с этим высказано предположение о роли мелкомасштабной турбулентности солнечного ветра в процессах ускорения магнитосферных электронов до релятивистских энергий.

4. Предложено простое объяснение известного факта более тесной связи скорости СВ с потоками релятивистских электронов по сравнению с корреляцией между УНЧ колебаниями и потоками таких электронов.

Авторы благодарят А.В. Гульельми и Б.И. Клайна за обсуждение результатов работы, Т.Н. Полюшкину за советы и помощь в подготовке материалов наблюдений. Мы благодарны Финскому метеорологическому институту (FMI) и Геологической службе США (USGS) за обеспечение высоких стандартов магнитных измерений сети Интермагнет ([www.intermagnet.org](http://www.intermagnet.org)) на обсерваториях Нурмиярви и Ситка, соответственно. Значения параметров солнечного ветра и ММП были заимствованы на сайте GSFC/SPDF OMNIWeb по адресу <http://omniweb.gsfc.nasa.gov>. Мы благодарны также руководителю проекта ACE/MAG Н.Ф. Нессу (N.F. Ness) и менеджеру данных Ч.У. Смитту (C.W. Smith) за предоставление открытого доступа к магнитным данным КА ACE с высоким разрешением, а также руководителю проекта GOES X. Зингеру (H. Singer).

Работа была поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (гранты 09-05-00048, 10-05-00661, 12-05-00007).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vinogradov P.A., Parkhomov V.A. MHD waves in the solar wind — A possible source of geomagnetic Pc3 pulsations // *Geomagnetizm i Aeronomiia*. 1975. V. 15. P. 134–137.
2. Потапов А.С., Полюшкина Т.Н., Бузевич А.В. Новые данные о связи дневных устойчивых геомагнитных пульсаций с параметрами солнечного ветра // *Исслед. по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца*. 1979. Вып. 49. С. 84–88.
3. Greenstadt E.W., Olson J.V., Loewen P.D. et al. // Correlation of Pc 3, 4, and 5 activity with solar wind speed // *J. Geophys. Res.* 1979. V. 84. P. 6694–6696.
4. Wolfe A., Lanzerotti L.J., MacLennan C.G. Dependence of hydromagnetic energy spectra on solar wind velocity and interplanetary magnetic field direction // *J. Geophys. Res.* 1980. V. 85. P. 114–118.



5. *Junginger H., Baumjohann W.* Dayside long-period magnetospheric pulsations: Solar wind dependence // *J. Geophys. Res.* 1988. V. 93. P. 877–883.
6. *Engebretson M., Glassmeier K.-H., Stellmacher M. et al.* The dependence of high latitude Pc5 wave power on solar wind velocity and on the phase of high speed solar wind streams // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. P. 26271–26283.
7. *Mathie R.A., Mann I.R.* On the solar wind control of Pc5 ULF pulsation power at mid-latitudes: Implications for MeV electron acceleration in the outer radiation belt // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. P. 29783–29796.
8. *Elkington S.R., Hudson M.K., Chan A.A.* Acceleration of relativistic electrons via drift-resonance interaction with toroidal-mode Pc5 ULF oscillations // *Geophys. Res. Lett.* 1999. V. 26. P. 3273–3276.
9. *Liu W.W., Rostoker G., Baker D.N.* Internal acceleration of relativistic electrons by large-amplitude ULF pulsations // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. P. 17391–17408.
10. *Губарь Ю.И.* Дрейфовый резонанс релятивистских электронов с УНЧ волнами как нелинейный резонанс // *Космич. исслед.* 2010. Т. 48. № 4. С. 308–316. (Cosmik Research. P. 300).
11. *Baker D.* Satellite anomalies due to space storms // *Space Storms and Space Weather Hazards* / Ed. by Daglis I.A. New York, Springer, 2001. Chap. 10. P. 251–284.
12. *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.* 1998. V. 79. № 40. P. 477–477. doi:10.1029/98EO00359.
13. *Fung S.F., Tan L.C.* Time correlation of low-altitude relativistic trapped electron fluxes with solar wind speeds // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25. 2361–2364.
14. *Mathie R.A., Mann I.R.* A correlation between extended intervals of ULF wave power and storm-time geosynchronous relativistic electron flux enhancements // *Geophys. Res. Lett.* 2000. V. 27. P. 3261–3264.
15. *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. Atmosph. Solar-Terr. Phys.* 2004. V. 66. P. 187–198.
16. *Walker A.D.M.* Excitation of field line resonances by MHD waves originating in the solar wind // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. № A12. doi: 10.1029/2001JA009188.
17. *Kessel R.L.* Solar wind excitation of Pc5 fluctuations in the magnetosphere and on the ground // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. № A04202. doi: 10.1029/2007JA012255.
18. *Marmet P.* New digital filter for the analysis of experimental data // *Rev. Sci. Instrum.* 1979. V. 50. № 1. P. 79–83.
19. *King J.H., Papitashvili N.E.* Interplanetary medium data book, supplement 5 // *Technical Report* 1988–1993. Greenbelt, MD: National Space Science Data Center, 1994.
20. *Мерков А.М., Поляков Л.Е.* Санитарная статистика. М.: Медицина, 1974.
21. *Hudson M.K., Elkington S.R., Lyon J.G. et al.* Simulations of radiation belt dynamics driven by solar wind variations // *Sun-Earth Plasma Connections* / Ed. by Burch J.L., Carovillano R.L., Antiochos S.K. Washington, D.C.: American Geophysical Union, 1999. P. 171–182.
22. *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. № 8. P. 1–10.
23. *Crooker N.U.* Solar cycle variations of the solar wind // *JPL Solar Wind Five. NASA Conference Publication.* 1983. P. 228. P. 303–314.
24. *Motoba T., Kikuchi T., Okuzawa T., Yumoto K.* Dynamical response of the magnetosphere-ionosphere system to a solar wind dynamic pressure oscillation // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. № A5. doi: 10.1029/2002JA009696.
25. *Tsurutani B.T., Gonzalez W.D., Gonzalez A.L.C. et al.* Interplanetary origin of geomagnetic activity in the declining phase of the solar cycle // *J. Geophys. Res.* 1995. V. 100. № A11. P. 21717–21734.
26. *Zolotukhina N.A.* Magnetospheric disturbances excited by solar wind density enhancements on April 11, 1997 // *Geomagnetism and Aeronomy.* 2006. V. 46. № 6. P. 688–700.
27. *Zolotukhina N., Pilipenko V., Engebretson M., Rodger A.* Response of the inner and outer magnetosphere to solar wind density fluctuations during the recovery phase of a moderate magnetic storm // *J. Atmosph. Solar-Terr. Phys.* 2007. V. 69. № 14. P. 1707–1722.
28. *Ukhorskiy A.Y., Sitnov M.I., Takahashi K., Anderson B.J.* Radial transport of radiation belt electrons due to stormtime Pc5 waves // *Ann. Geophys.* 2009. V. 27. P. 2173–2181.
29. *Fejer J.* Hydromagnetic stability at a fluid velocity between compressible fluids // *Phys. Fluids.* 1964. V. 7. P. 499–503.
30. *Fujita S., Glassmeier K.H., Kamide K.* MHD waves generated by the Kelvin-Helmholtz instability in a nonuniform magnetosphere // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101. P. 27317–27326.
31. *McKenzie J.F.* Hydromagnetic wave interaction with the magnetopause and the bow shock // *Planet. Space Sci.* 1970. V. 18. P. 1–23.
32. *Бархатов Н.А.* Ослабление ультранизкочастотных волн в переходной области // *Геомагнетизм и аэронавтика.* 1982. Т. 22. С. 819–823.
33. *Клайн Б.И., Потапов А.С.* Влияние финитных движений на неустойчивость тангенциальных разрывов в магнитосфере Земли // *Исследования по геомагнетизму, аэронавтике и физике Солнца.* 1973. Вып. 27. С. 49–53.
34. *Mishin V.V.* Accelerated motions of the magnetopause as a trigger of the Kelvin-Helmholtz instability // *J. Geophys. Res.* 1993. V. 98. № A12. P. 21365–21371.
35. *Farrugia C.J., Gratton F.T., Bender L. et al.* Charts of joint Kelvin-Helmholtz and Rayleigh-Taylor instabilities at the dayside magnetopause for strongly northward interplanetary magnetic field // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. P. 6703–6727.
36. *Потапов А.С., Полюшкина Т.Н.* Экспериментальное свидетельство прямого проникновения ULF-волн из солнечного ветра и ускорения ими электронов радиационного пояса // *Солнечно-земная физика.* 2010. Вып. 15. С. 28–34.
37. *Klain B.I., Kurazhkovskaya N.A.* The possible excitation mechanism of the burst regimes of long-period irregular pulsations (the series of ipcl bursts) // *Geophysical Research Abstracts.* 2010. V. 12. EGU2010–155.