

Связь между вариациями параметров солнечного ветра и индексом геомагнитной активности A_p в 2003 – 2005 гг.

И. С. Фалькович, М. Р. Оляк, Н. Н. Калиниченко, И. Н. Бубнов

*Радиоастрономический институт НАН Украины,
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина
E-mail: marinaolyak@gmail.com; falk@ri.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 20 января 2011 г.

Статья посвящена сопоставлению полученных из наблюдений 2003–2005 гг. параметров солнечного ветра с геомагнитным индексом A_p . Определены некоторые характерные черты потоков солнечного ветра, вызвавших геомагнитные возмущения на спаде 23-го цикла солнечной активности. В частности, показано, что значения скорости для потоков солнечного ветра, вызвавших в периоды наблюдений геомагнитные возмущения, в среднем ниже, а показателя пространственного спектра флуктуаций электронной концентрации выше, чем для квазистационарного высокоскоростного солнечного ветра.

Ключевые слова: солнечный ветер, спектр мерцаний, геомагнитный индекс A_p

1. Введение

Известно, что наиболее сильные геомагнитные бури наблюдаются во время прохождения в окрестностях Земли крупномасштабных возмущений межпланетной среды, таких, как ударные волны, магнитные облака, области сжатия на границе разноскоростных течений солнечного ветра и некоторые другие [1]. Сопоставление солнечных явлений с возникновением геомагнитных возмущений и бурь показывает, что эффективность предсказания геомагнитных бурь не превышает 30 ÷ 40 % [1, 2]. В связи с этим особый интерес представляет поиск новых подходящих для прогнозирования характеристик, которые должны помочь повысить надежность прогноза.

Значительную часть информации о параметрах солнечного ветра получают методом мерцаний [3]. Наблюдения мерцаний компактных радиоисточников на неоднородностях межпланетной плазмы позволяют определить дисперсию и показатель пространственного спектра неоднородностей, а также скорость солнечного

ветра. Целью настоящей работы является разработка методики определения из наблюдений межпланетных мерцаний параметров потоков солнечного ветра на расстояниях от Солнца, больших 1 а. е., а также определение в серии наблюдений межпланетных мерцаний на спаде 23-го цикла солнечной активности в 2003 – 2005 гг. параметров потоков солнечного ветра, вызвавших геомагнитные возмущения, для выявления подходящих для прогнозирования “космической погоды” характеристик.

2. Спектры мерцаний при потоковой структуре солнечного ветра

Пусть монохроматическое радиоизлучение с частотой ω распространяется вдоль оси z и пересекает K областей случайно-неоднородной межпланетной плазмы. Каждой области толщиной l_j соответствует значение дисперсии флуктуаций электронной концентрации вдоль луча зрения $\sigma_{N_j}(\vec{R}_j)$, \vec{R}_j – радиус-вектор точки на луче зрения, $j = 1, \dots, K$. Предположим, что скорость перемещения неоднородностей

внутри каждой области \vec{v}_j постоянна и направлена вдоль радиального направления от Солнца. Введем перпендикулярную лучу зрения компоненту скорости переноса неоднородностей $\vec{v}_{j\perp}$ и рассмотрим режим слабых мерцаний. Используя приближение квазистационарности [4], гипотезу локальной вмороженности неоднородностей [5] и методику вычисления с помощью метода фейнмановских интегралов по траекториям пространственно-временных корреляционных функций и спектров флуктуаций интенсивности [6, 7], получим для спектра мерцаний на выходе из K -й области выражение в виде суммы:

$$W(f) = \sum_{j=1}^K W_j(v_j, f). \quad (1)$$

Здесь

$$W_j(v_j, f) \approx 2\pi \left(\frac{4\pi^2 r_e}{k} \right)^2 \int_0^1 d\zeta \int_{u_j}^{\infty} \kappa_{\perp} l_j \zeta^{-1/2} \times \\ \times \sin^2 \left(\kappa_{\perp} l_j \zeta / 2k \right) \frac{\Phi_{N_j}(\kappa_{\perp}, 0)}{\left(\kappa_{\perp}^2 v_{j\perp}^2(\zeta) - 4\pi^2 f^2 \right)^{1/2}} \times \\ \times \exp \left(-\frac{1}{2} \kappa_{\perp}^2 L^2 \zeta^2 \theta^2 \right) d\kappa_{\perp} -$$

составляющая спектра, обусловленная рассеянием на неоднородностях j -й области, $k = \omega/c$, r_e – классический радиус электрона, θ – угловой размер источника с гауссовым распределением радиояркости, $\kappa_{\perp} = |\vec{\kappa}_{\perp}|$, $\vec{\kappa}_{\perp} = \{\kappa_x, \kappa_y\}$ – перпендикулярная составляющая волнового вектора, $u_j = 2\pi f / v_{j\perp}(\zeta)$, $v_{j\perp}(\zeta) = v_j \sin \varphi [R_0 / R_j(\zeta)]$, $R_j(\zeta) = \left(R_0^2 - 2R_0 \left(l_j \zeta + \sum_{i=1}^{j-1} l_i \right) \cos \varphi + \left(l_j \zeta + \sum_{i=1}^{j-1} l_i \right)^2 \right)^{1/2}$ – радиус-вектор точки на луче зрения, φ – угол элонгации, $\zeta = 1 - z/l_j$, $R_0 = 1$ а. е., $L = \sum_{j=1}^K l_j$. Трехмерный пространственный

спектр флуктуаций электронной концентрации внутри j -го слоя $\Phi_{N_j}(\kappa_{\perp}, 0) \propto \sigma_{N_j}^2(\zeta) \kappa_{\perp}^{-n_j} \times \exp(-\kappa_{\perp}^2 \lambda_{j0}^2) \Lambda_{j0}^{3-n_j}$ предполагаем степенным и изотропным [8], $\sigma_{N_j}^2(\zeta) = \sigma_{0j}^2 [R_0 / R_j(\zeta)]^{2\alpha_j}$ – дисперсия флуктуаций плотности электронов вдоль луча зрения, зависимость $\sigma_{N_j}^2(\zeta)$ от ζ обусловлена сферической геометрией задачи (см., например, [8, 9]), σ_{0j}^2 – дисперсия флуктуаций плотности электронов на уровне орбиты Земли, n_j – показатель трехмерного пространственного спектра флуктуаций электронной концентрации, λ_{j0} и Λ_{j0} – соответственно внутренний и внешний масштабы турбулентности.

3. Статистический анализ параметров солнечного ветра и индекса геомагнитной активности Ap

Полученное выражение для спектров мерцаний (1) было использовано для интерпретации результатов наблюдений межпланетных мерцаний. Анализировались параметры солнечного ветра, которые были определены из наблюдений межпланетных мерцаний в период с февраля 2003 г. по декабрь 2005 г. Наблюдения проводились на радиотелескопе УТР-2 ежемесячно в течение одной недели на частотах 20, 23 и 25 МГц [10]. Радиоисточники наблюдались в ночное время вблизи верхней кульминации. Всего в таком режиме удалось изучить мерцания 8 радиоисточников, расположенных на гелиоширотах от -1.3° до 71.8° при углах элонгации $\varphi = 85.3^\circ \div 175.4^\circ$. Более подробно методика, использовавшаяся для получения экспериментальных данных, изложена в работе [10]. По итогам наблюдений было обработано 128 среднесуточных спектров мерцаний (рис. 1).

В ходе исследования был проанализирован коэффициент корреляции между индексом межпланетных мерцаний m и среднесуточным геомагнитным индексом Ap [11]. Известно (см., например, [12, 13]), что для малых углов элонгации $\varphi < 90^\circ$ максимальный коэффициент корреляции между индексами межпланетных мерцаний и геомагнитными индексами Ap имеет место, когда с индексами Ap сравниваются индексы мерцаний, полученные на 1 сутки

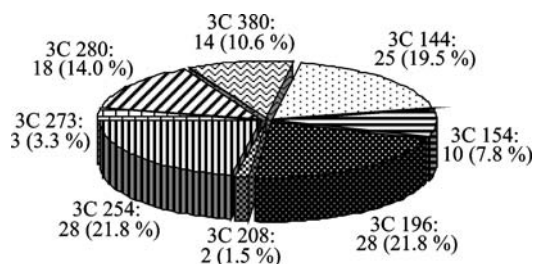


Рис. 1. Состав выборки наблюдений спектров мерцаний в 2003–2005 гг.

раньше. В нашем случае при наблюдениях на больших элонгациях ($\phi \geq 90^\circ$) положительная корреляция между индексами межпланетных мерцаний и индексами A_p была получена при запаздывании наблюдений мерцаний на 2–3 дня относительно A_p -индексов, т. е., согласно модельным расчетам спектров мерцаний, на ближайшей к наблюдателю границе области, ответственной за возникновение мерцаний. Максимальный статистически значимый коэффициент корреляции между индексом мерцаний m и геомагнитным A_p -индексом $r_{A_p,m} = 0.32$ получен для начала спада максимума солнечной активности в 2003 г. при запаздывании наблюдений мерцаний относительно индекса A_p на 3 дня. В 2004 и 2005 гг., по мере приближения к периоду минимума солнечной активности, коэффициент корреляции уменьшается соответственно до значений 0.11 и 0.16, однако данные значения не являются статистически значимыми. На рис. 2 приведена диаграмма рассеяния, отражающая взаимосвязь геомагнитного индекса A_p и индекса мерцаний m , для наблюдений 2003 г. Прямая линия на рис. 2 – линия регрессии, угол между линией регрессии и ближайшей осью графика характеризует корреляционную зависимость между величинами m и A_p [14]. Диаграмма рассеяния, по аналогии с [13], наглядно демонстрирует распределение наблюдений мерцаний и соответствующих им значений геомагнитных индексов A_p . Полученные относительно низкие значения коэффициента корреляции могут быть связаны как со слабой корреляционной зависимостью между индексами мерцаний и A_p для отмеченных в период наблюдений слабых

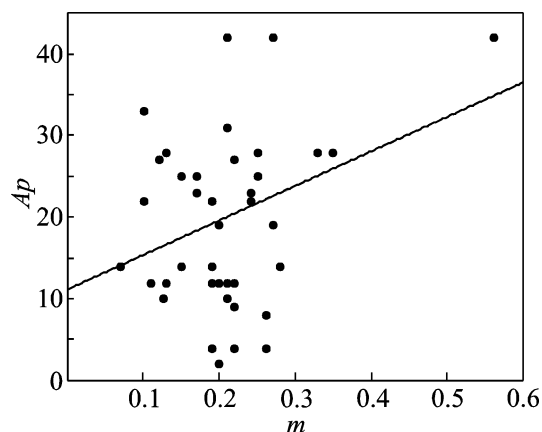


Рис. 2. Диаграмма рассеяния, отражающая взаимосвязь геомагнитного индекса A_p и индекса мерцаний, по данным 2003 г. при запаздывании наблюдений мерцаний относительно индекса A_p на 3 дня, $r_{A_p,m} = 0.32$

и умеренных геомагнитных возмущений, так и с тем, что из-за недостаточного количества наблюдаемых источников анализировалась корреляция между геомагнитными индексами и индексами мерцаний для отдельных источников. Более высокие коэффициенты корреляции можно получить, согласно [12, 13], при сопоставлении геомагнитных индексов и средних индексов мерцаний для всех просвечивающих данную область неба мерцающих источников.

Определение параметров солнечного ветра проводилось путем совмещения экспериментальных спектров с рассчитанными по формуле (1) спектрами отдельно для односкоростной (сферически симметричной) модели при $K = 1$ и потоковой модели при $K = 2, 3$ с использованием метода наименьших квадратов. Окончательный выбор модели и соответственно параметров $v = v_{1,2,3}$ и $n = n_{1,2,3}$ производился по наименьшему среднеквадратическому отклонению, полученному для каждой модели. На рис. 3 сплошной кривой 1 представлен нормированный на спектральную плотность нулевой гармоники $W_0 = W(0)$ усредненный экспериментальный спектр мерцаний для радиочастотного источника 3C 144, полученный 19 сентября 2003 г. для угла элонгации $\phi = 92.2^\circ$. Кривые 2 и 3 соответствуют расчетным спектрам мерца-

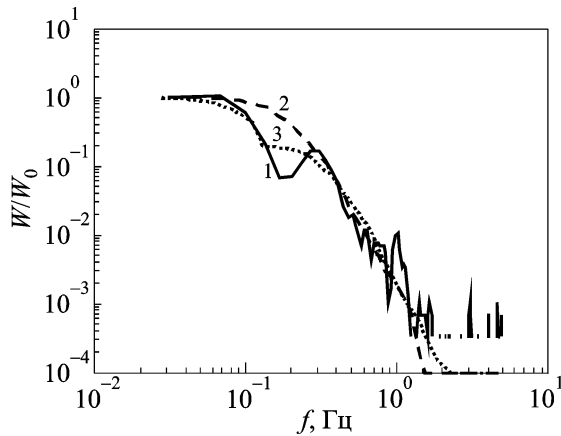
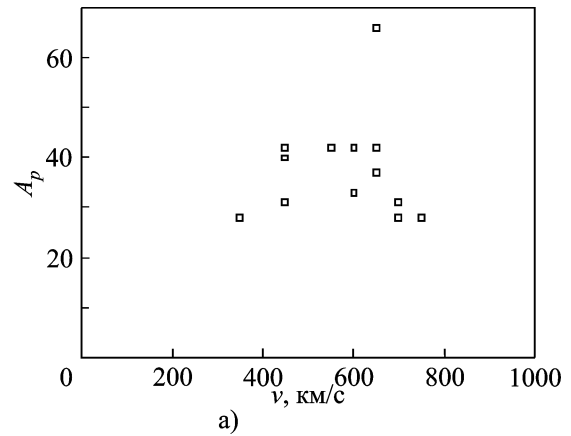


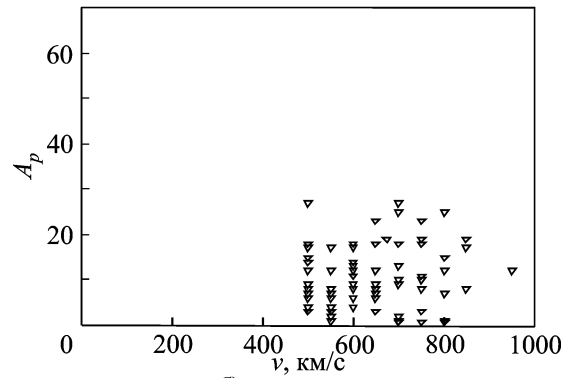
Рис. 3. Спектр межпланетных мерцаний радиоисточника 3C 144 (кривая 1) и расчетные спектры мерцаний для односкоростной модели при $v_1 = 500$ км/с, $n_1 = 3.7$ (кривая 2) и двухпоточковой модели при $v_1 = 650$ км/с, $n_1 = 3.7$, $l_1 = 0.75$ а. е. и $v_2 = 350$ км/с, $n_2 = 3.8$ (кривая 3)

ний для сферически симметричной и потоковой моделей. В приведенном примере сопоставление сферически симметричной модели с экспериментом дало большую погрешность, и для дальнейшего анализа были отобраны значения скорости v и показателя пространственного спектра неоднородностей n , полученные с использованием двухпоточковой модели.

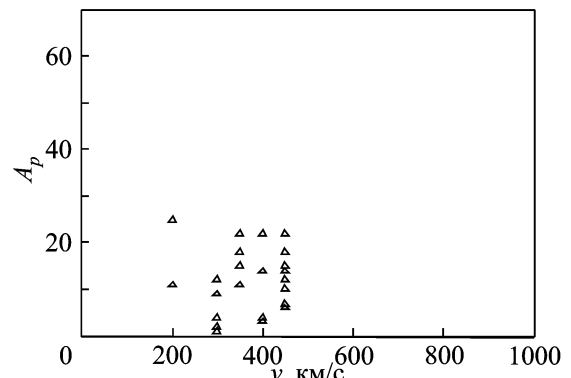
Значения параметров солнечного ветра и соответствующие периодам наблюдений среднесуточные значения индексов геомагнитной активности A_p были разбиты на три группы. В первую группу вошли результаты наблюдений событий, вызвавших на Земле магнитные возмущения и бури ($A_p \geq 28$ [2]). Во второй и третьей группах представлены результаты наблюдений событий, не вызвавших геомагнитных возмущений (индекс $A_p < 28$). При этом во вторую группу были включены результаты наблюдений высокоскоростного солнечного ветра со значениями скорости $v \geq 500$ км/с [15]. Соответственно в третью группу вошли наблюдения медленного солнечного ветра, $v < 500$ км/с. На рис. 4 для каждой из групп представлены диаграммы рассеяния, отражающие взаимосвязь индекса A_p и значений скорости солнечного ветра, при за-



а)



б)



в)

Рис. 4. Диаграммы рассеяния, отражающая взаимосвязь геомагнитного индекса A_p и скорости солнечного ветра, при запаздывании наблюдений на 3 дня относительно индекса A_p для первой (а), второй (б) и третьей (в) групп данных

паздывании наблюдений на 3 дня относительно индекса A_p . Данное графическое представление наглядно показывает распределение результатов наблюдений при различных значе-

ниях скорости и индекса A_p как по группам, так и внутри каждой группы. Для всех групп были определены средние по группе значения параметров A_p , v , n и m , полученные результаты представлены в табл. 1 и 2. Статистическая обработка данных, помимо вычисления среднего арифметического, включала вычисление ошибки среднего. Сравнение групп данных было проведено с использованием дисперсионного анализа Краскела–Уоллиса, U-теста Манна–Уитни и медианного теста [14], отличия между средними значениями v , n и A_p для различных групп статистически значимы. Следует отметить, что диапазон изменений приведенных в таблицах величин различен: A_p может изменяться от 0 до $300 \div 400$ (см., например, [2, 11]), индекс мерцаний не превышает 1, скорость солнечного ветра на уровне орбиты Земли обычно лежит в пределах $250 \div 850$ км/с [15, 16], показатель трехмерного пространственного спектра турбулентности в солнечном ветре изменяется в пределах $3.0 \div 4.0$ [8, 16]. Согласно принятой классифи-

кации (см., например, [2]), геомагнитные бури с индексом A_p , равным $28 \div 66$ (см. рис. 4, а), и средним индексом A_p , соответственно равным 32 и 37 (см. группы 1 в табл. 1 и 2), относятся к слабым и умеренным геомагнитным бурям. Представляется естественным, что не слишком большим, по сравнению с общим диапазоном значений, изменениям индексов A_p от группы к группе соответствуют заметные изменения не всех параметров солнечного ветра, а только скорости. Вместе с тем отличия в показателе трехмерного пространственного спектра турбулентности на величину порядка $0.1 \div 0.2$ могут свидетельствовать о различных типах турбулентности в солнечном ветре [8, 16].

4. Обсуждение результатов

Известно (см., например, [1, 17]), что геомагнитные возмущения и бури достаточно часто связаны с распространением ударных волн, вызванных корональными выбросами массы (КВМ). Несколько более высокие средние значения индексов мерцаний в первой группе табл. 2 также могут указывать на связь геомагнитных возмущений с прохождением ударных волн, вызванных КВМ. Скорости указанных ударных волн и связанных с ними спорадических высокоскоростных потоков солнечного ветра быстро убывают с расстоянием от Солнца и вблизи орбиты Земли могут оказаться ниже, чем скорость квазистационарных высокоскоростных потоков, не вызывающих, согласно [1, 17], геомагнитных возмущений. Соответственно полученные из наблюдений межпланетных мерцаний значения скорости для потоков солнечного ветра, вызвавших геомагнитные возмущения (рис. 4, а и табл. 1 и 2, группа 1), в среднем ниже, чем для квазистационарного высокоскоростного солнечного ветра (группа 2). Этот эффект можно также связать с тем, что плотность вещества в медленных потоках (стримерах) убывает пропорционально расстоянию от Солнца, в то время как в высокоскоростных радиально направленных потоках солнечного ветра – пропорционально квадрату расстояния [9, 17].

Таблица 1. Средние значения параметров солнечного ветра при запаздывании наблюдений на 2 дня относительно индекса A_p

Параметр	1 группа ($N = 19$)	2 группа ($N = 87$)	3 группа ($N = 22$)
A_p	32 ± 1	10 ± 1	9 ± 1
m	0.21 ± 0.03	0.21 ± 0.01	0.21 ± 0.02
v , км/с	510 ± 40	650 ± 10	390 ± 10
n	3.6 ± 0.05	3.5 ± 0.05	3.8 ± 0.05

Примечание. Здесь и в табл. 2 величина N – число элементов группы.

Таблица 2. Средние значения параметров солнечного ветра при запаздывании наблюдений на 3 дня относительно индекса A_p

Параметр	1 группа ($N = 14$)	2 группа ($N = 87$)	3 группа ($N = 27$)
A_p	37 ± 3	10 ± 1	12 ± 1
m	0.24 ± 0.04	0.21 ± 0.01	0.19 ± 0.04
v , км/с	590 ± 40	650 ± 10	380 ± 10
n	3.6 ± 0.05	3.5 ± 0.05	3.8 ± 0.05

Относительно низкие средние значения скорости в первой группе табл. 1 и совпадающие средние значения индексов мерцаний во всех трех группах в табл. 1 позволяют предположить, что не все вызвавшие геомагнитные возмущения потоки солнечного ветра спустя 2 дня после возникновения на Земле магнитной бури достигают области, ответственной за возникновение мерцаний. Как видно из табл. 2, средние индексы мерцаний во второй и в третьей группах также практически совпадают. Это может означать, что во второй группе представлены как квазистационарные высокоскоростные потоки, так и связанные с КВМ ударные волны, не вызвавшие геомагнитных возмущений. Следует отметить, что наблюдения относятся к периоду спада максимума 23-го цикла солнечной активности. Источниками квазистационарного высокоскоростного солнечного ветра в этот период могут быть не только полярные корональные дыры, но и локальные коронарные дыры, расположенные на более низких гелиоширотах [18]. Однако чтобы квалифицировать конкретный высокоскоростной поток как квазистационарный или спорадический требуются более длительные периоды наблюдений, поскольку время жизни квазистационарных высокоскоростных потоков солнечного ветра обычно превышает 10 суток [17]. В табл. 1 и 2 представлены также средние значения показателя трехмерного пространственного спектра флуктуаций электронной концентрации n . В первой группе, которой соответствуют наблюдения потоков солнечного ветра, вызвавших геомагнитные возмущения, значения n в среднем несколько выше, чем в группе 2 для квазистационарного высокоскоростного солнечного ветра, но ниже, чем в группе 3 для медленного солнечного ветра.

5. Заключение

Проведено сопоставление геомагнитного индекса A_p с результатами наблюдений межпланетных мерцаний в период спада 23-го цикла солнечной активности. Полученные из наблюдений межпланетных мерцаний значения скорости для потоков солнечного ветра,

вызвавших на Земле умеренные магнитные возмущения и бури, были в среднем ниже, чем для квазистационарного высокоскоростного солнечного ветра, но выше, чем для медленного солнечного ветра. Показатель пространственного спектра флуктуаций электронной концентрации для потоков солнечного ветра, вызвавших геомагнитные возмущения, в среднем несколько выше, чем для квазистационарного высокоскоростного солнечного ветра, и ниже, чем для медленного солнечного ветра.

В целом проведенное исследование показало, что анализ спектров межпланетных мерцаний позволяет выделить характерные особенности потоков солнечного ветра, вызывающих в период спада солнечной активности геомагнитные возмущения, и может быть в дальнейшем использован для усовершенствования методик прогнозирования магнитных бурь на Земле.

Работа выполнялась при частичной финансовой поддержке целевой программы НАН Украины “Научные основы, методическое обеспечение создания системы мониторинга геосистем на территории Украины (GEO-UA)”.

Авторы выражают благодарность рецензентам за полезные замечания.

Литература

1. Зеленый Л. М., Ермолаев Ю. И. Ветер, ветер, ты могуч... // *Природа*. – 2005. – Т. 5, №9. – С. 732-740.
2. Joselyn J. A. Geomagnetic activity forecasting: the state of the art // *Rev. Geophysics*. – 1995. – Vol. 33, No. 3. – P. 383-401.
3. Бовкун В. П., Жук И. Н. Спектр турбулентности и скорость солнечного ветра на элонгация 90-150 // *Изв. вузов. Радиофизика*. – 1982. – Т. 25, №7. – С. 732-740.
4. Татарский В. И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. – М.: Наука, 1967. – 548 с.
5. Лотова Н. А. Радиоастрономические исследования тонкой структуры солнечного ветра // *Итоги науки и техники. Серия Астрономия*. – М.: ВИНТИ. – 1988. – Т. 33. – С. 121-144.
6. Kukushkin A. and Olyak M. Propagation effects in the radio interferometry of polarized radiation // *Waves in Random Media*. – 1994. – Vol. 4, No. 1. – P. 59-81.

7. Оляк М. Р. О влиянии турбулентных течений в солнечном ветре на мерцания в декаметровом диапазоне длин волн // Кинематика и физика небесных тел. – 2009. – Т. 25, №4. – С. 297-306.
8. Алексеев Г. А., Гельфрейх Г. Б., Зайцев В. В., Илясов Ю. П., Кайдановский Н. Л., Матвеев Л. И., Мень А. В., Молчанов А. П., Степанов А. П., Шишов В. И. Советские радиотелескопы и радиоастрономия Солнца. – М.: Наука, 1990. – 212 с.
9. Коваленко В. А. Солнечный ветер. – М.: Наука, 1983. – 272 с.
10. Фалькович И. С., Коноваленко А. А., Калинин Н. Н., Оляк М. Р., Гридин А. А., Бубнов Н. И., Лекашо А., Рукер Х. О. Вариации параметров струйной структуры солнечного ветра на расстояниях более 1 а. е. в 2003-2004 гг. // Радиофизика и радиоастрономия. – 2006. – Т. 11, №1. – С. 31-41.
11. <<http://www.wdsb.ru/stp/data/geomagni.ind/>>
12. Власов В. И., Шишов В. И., Шишова Т. Д. Связь между вариациями индекса геомагнитной активности и параметров межпланетных мерцаний // Геомагнетизм и аэрономия. – 1985. – Т. 25, №2. – С. 254-258.
13. Harrison R. A. and Lucek E. A. Interplanetary scintillation and space weather monitoring // Proc. of ESA Workshop on Space Weather. – Noordwijk (Netherlands). – 1998. – P. 487-489.
14. Боровиков В. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере: Для профессионалов. 2-е изд. – Санкт-Петербург: Питер, 2003. – 688 с.
15. Sorriso-Valvo L., Carbone V., Vettri P., Consolini C., and Bruno R. Intermittency in the solar wind turbulence through probability distribution functions of fluctuations // Geophys. Res. Lett. – 1999. – Vol. 26, No. 13. – P. 1801-1804.
16. Bruno R., and Carbone V. The solar wind as a turbulence laboratory // Living Rev. Sol. Phys. – 2005. – Vol. 2. – 178 p. – <<http://www.livingreviews.org/lrsp-2005-4>>.
17. Хвиюзова Т. А. Солнечные источники и типы потоков солнечного ветра // В сб. ПГИ “Физика околоземного космического пространства”. – Апатиты: ПГИ. – 2000. – Т. 2. – <<http://www.kosmofizika.ru/owz/starkov/hviuzova.htm>>.
18. Лотова Н. А., Владимирский К. В., Обридко В. Н. Диагностика потоков солнечного ветра // Письма в АЖ. – 2008. – Т. 34, №7. – С. 551-560.

Зв’язок між варіаціями параметрів сонячного вітру та індексом геомагнітної активності A_p у 2003 – 2005 рр.

**І. С. Фалькович, М. Р. Оляк,
М. М. Калиниченко, І. М. Бубнов**

Стаття присвячена порівнянню отриманих зі спостережень 2003–2005 рр. параметрів сонячного вітру з геомагнітним індексом A_p . Визначено деякі характерні риси потоків сонячного вітру, що спричинили геомагнітні бурі на спаді 23-го циклу сонячної активності. Зокрема, показано, що значення швидкості для потоків сонячного вітру, що викликали в періоди спостережень геомагнітні збурення, у середньому нижче, а показника просторового спектра флуктуацій електронної концентрації вище, ніж для квазістаціонарного високошвидкісного сонячного вітру.

Association between Variations of the Solar Wind Parameters and Geomagnetic Activity Index A_p in 2003 – 2005

**I. S. Falkovich, M. R. Olyak,
N. N. Kalinichenko, and I. N. Bubnov**

The paper is devoted to comparison of a geomagnetic index A_p with solar wind parameters received from observations during 2003–2005. Some characteristic features of the solar wind geoeffective flows on the decline of the 23rd cycle of solar activity are determined. In particular, the speed of the solar wind geoeffective flows during the observation periods is shown to be on the average lower, and the spatial fluctuations spectrum index higher than that for the quasistationary high-speed solar wind.