

УДК 523.62

PACS numbers: 95.30.Jx,
95.75.Pq, 95.85.BhМ. Р. ОЛЬЯК¹, Н. Н. КАЛИНИЧЕНКО¹, А. А. КОНОВАЛЕНКО¹,
А. И. БРАЖЕНКО², И. Н. БУБНОВ¹¹ Радиоастрономический институт НАН Украины,
ул. Мистецтв, 4, г. Харьков, 61002, Украина
E-mail: marinaolyak@gmail.com² Полтавская гравиметрическая обсерватория
Института геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины,
ул. Мясоедова, 27/29, г. Полтава, 36029, Украина

СПЕКТР ТУРБУЛЕНТНОСТИ МЕЖПЛАНЕТНОЙ ПЛАЗМЫ НА РАССТОЯНИЯХ ОТ СОЛНЦА БОЛЬШИХ 1 А. Е.

Предмет и цель работы: *Анализируются вариации параметров солнечного ветра на расстояниях от Солнца порядка 1 а. е. и больше.*

Методы и методология: *Метод фейнмановских интегралов по траекториям был применен для вычисления временных спектров и дисперсионных зависимостей дрейфовой скорости межпланетных мерцаний. Полученные выражения были использованы для сопоставления с экспериментальными спектрами и дисперсионными зависимостями дрейфовой скорости и определения параметров солнечного ветра.*

Результаты: *По данным наблюдений на радиотелескопах УТР-2 и УРАН-2 в 2003–2011 гг. были определены параметры быстрого и медленного солнечного ветра и выполнен анализ полученных данных. Построены эмпирические радиальные зависимости спектров турбулентности быстрого и медленного солнечного ветра.*

Заключение: *Показано, что турбулентность медленного солнечного ветра хорошо описывается законом Колмогорова для гидродинамической турбулентности, турбулентность быстрого квазистационарного солнечного ветра описывается законом Прошника–Кречна для магнитогидродинамической турбулентности.*

Ключевые слова: *межпланетные мерцания, быстрый и медленный солнечный ветер, трехмерный пространственный спектр флуктуаций электронной концентрации*

1. Введение

Солнечный ветер непостоянен, и мы можем наблюдать вариации его параметров в широком диапазоне пространственно-временных масштабов. Многочисленные исследования подтверждают существование неоднородностей в распределениях плотности и скорости солнечного ветра как на близких расстояниях от Солнца, так и за орбитой Земли (см., например, [1, 2]). Характерные пространственные масштабы изменений параметров солнечного ветра при этом меняются в широких пределах от нескольких километров до $10^5 \div 10^6$ км. На протяжении последних десятилетий исследования солнечного ветра проводились в двух глобальных направлениях. Во-первых, непосредственное измерение параметров межпланетной среды на борту космических аппаратов, находящихся на орбите Земли. Эти исследования включают в себя анализ измерений межпланетного магнитного поля, скорости солнечного ветра и его

плотности [1]. Следует, однако, иметь в виду, что подобные наблюдения позволяют определить параметры межпланетной среды непосредственно вблизи расположения космического аппарата. Еще одно не менее важное направление – это наземные наблюдения, в том числе наблюдения межпланетных мерцаний [3–5]. Измерения спектров межпланетных мерцаний позволяют анализировать скорость и спектр флуктуаций плотности электронов солнечного ветра в направлении мерцающего радиосточника, а наблюдения большого количества мерцающих радиосточников дают возможность восстановить пространственное распределение скорости и плотности межпланетной плазмы. Получаемое таким образом пространственное распределение параметров усредняется по общей толщине рассеивающей области или по толщине отдельных участков внутри общей области рассеяния в зависимости от используемой модели солнечного ветра [6].

При измерении параметров солнечного ветра на борту космического аппарата обычно рассматривают временные флуктуации параметров, масштабы которых могут меняться в широких пре-

делах от долей секунды до десятков часов и суток. Связь между временными и пространственными флуктуациями описывает гипотеза замороженности флуктуаций Тэйлора (см., например [7]). В ранних исследованиях солнечного ветра с помощью космических аппаратов в 70–80-е гг. XX столетия было установлено, что наблюдаемые мелкомасштабные флуктуации параметров солнечного ветра в первом приближении хорошо описываются стационарной во времени и пространственно однородной турбулентностью [8]. Впоследствии было обнаружено, что турбулентность в солнечном ветре обладает перемежаемостью (участки спокойного течения сменяются участками сильно флуктуирующих параметров), а спектр флуктуаций имеет степенной вид с показателем спектра, зависящим от частотного диапазона и выбранного временного интервала (см., например, [9, 10]). Изучая различные типы солнечного ветра на расстояниях от Солнца порядка 1 астрономической единицы (а. е.), авторы [11] обнаружили, что наибольший уровень флуктуаций плотности наблюдался в корональных выбросах массы, а наименьший – в потоках от корональных дыр. В последние годы заметные результаты были получены при изучении свойств турбулентности параметров солнечного ветра с высоким временным разрешением до 0.03 с [12, 13]. Анализ временных спектров флуктуаций параметров солнечного ветра показал определенное их различие в зависимости от масштаба. В низкочастотной части инерционного интервала спектра, где содержится большая часть энергии колебаний, наклон спектра мощности близок к единице. В среднечастотной части инерционного интервала (от 0.01 до 0.2 Гц) наклон спектра хорошо описывается законом Колмогорова для гидродинамической турбулентности. В диссипативном интервале (от 0.2 до 5 Гц) наклон спектра мощности заметно возрастает.

Для изучения флуктуаций плотности солнечного ветра и построения спектров флуктуаций электронов солнечного ветра в инерционном интервале, наряду с исследованиями с помощью космических аппаратов, достаточно часто использовались и используются в настоящее время наземные наблюдения, в том числе измерения и анализ межпланетных мерцаний, [3–5, 14–17]. Такие наблюдения позволяют изучать распределение флуктуаций параметров солнечного ветра

в зависимости от расстояния и гелиошироты [3, 5]. Для областей солнечного ветра, лежащих на расстоянии от нескольких радиусов Солнца R_S до порядка $200R_S$, были проанализированы пространственные спектры флуктуаций электронов солнечного ветра и построены их эмпирические модели [17–21]. В результате исследований было установлено, что трехмерный пространственный спектр флуктуаций плотности электронов является степенным. Значения показателя спектра лежат в пределах $3.1 \div 4.0$, среднее значение показателя спектра составляет $3.5 \div 3.7$. В упомянутых работах исследовались области солнечного ветра на расстояниях, не превышающих 1 а. е. В ряде работ результаты, полученные для относительно близких к Солнцу областей, распространялись на более дальние области [2, 22]. При этом авторы обычно предполагали, что флуктуации плотности солнечного ветра убывают с расстоянием по квадратичному закону. Использование декаметрового диапазона длин волн позволяет исследовать внешние области межпланетной среды при углах элонгации, больших 90° . Область рассеяния в этом случае расположена на расстоянии от Солнца порядка 1 а. е. и более, а ее протяженность может достигать $2 \div 3$ а. е. [23]. Это позволяет даже при небольшом количестве просвечивающих источников анализировать убывание флуктуаций электронной концентрации при увеличении расстояния от Солнца.

Целью настоящей работы явилось изучение вариаций параметров и построение эмпирических радиальных зависимостей спектра турбулентности быстрого и медленного солнечного ветра для расстояний от Солнца, превышающих 1 а. е.

2. Определение параметров солнечного ветра

Наблюдения межпланетных мерцаний удаленных космических радиоисточников проводились на радиотелескопах УТР-2 и УРАН-2 в различные периоды цикла солнечной активности с февраля 2003 г. по февраль 2011 г. на частоте $f_0 = 25$ МГц. По результатам наблюдений были построены временные спектры, пространственно-временные кросс-спектры мерцаний и дисперсионные зависимости дрейфовой скорости мерцаний. Полученные экспериментальные спектры и дисперсионные зависимости были использованы для сопос-

тавления с расчетными спектрами $W(f)$ и дисперсионными зависимостями $V_f(f)$ для нескольких моделей солнечного ветра (более подробно см. [6, 23–27]).

При построении расчетных спектров и дисперсионных зависимостей для односкоростной модели солнечного ветра предполагалось, что луч зрения (ось z) пересекает направленный радиально от Солнца поток солнечного ветра шириной d_1 со скоростью v_1 и показателем трехмерного спектра флуктуаций электронной концентрации n_1 . Убывание флуктуаций электронной концентрации при увеличении расстояния от Солнца описывается степенным законом с показателем α_1 . Для двухпоточковой и трехпоточковой моделей солнечного ветра предполагалось, что луч зрения последовательно пересекает соответственно два или три потока солнечного ветра шириной d_1 , d_2 и d_3 с параметрами v_1 , n_1 , α_1 ; v_2 , n_2 , α_2 и v_3 , n_3 , α_3 соответственно. С помощью метода Фейнмановских интегралов по траекториям были получены следующие выражения для спектров $W(f)$, кросс-спектров $W(b, f)$ и дисперсионных зависимостей дрейфовой скорости мерцаний $V_f(f)$ [6, 27]:

$$W(f) = \sum_{m=1}^M W_m(v_m, f),$$

$$W_m(v_m, f) \approx$$

$$\approx 2\pi I_0^2 d_m \left(\frac{4\pi^2 r_e}{k} \right)^2 \int_0^1 d\zeta \int_{2\pi f/v_{m\perp}}^{\infty} \sin^2 \left(\frac{\kappa_{m\perp}^2 d_m \zeta}{2k} \right) \times \\ \times \frac{\kappa_{m\perp} \Phi_{Nm}(\kappa_{m\perp}, 0, \zeta)}{\sqrt{\zeta(\kappa_{m\perp}^2 v_{m\perp}^2(\zeta) - 4\pi^2 f^2)}} \exp \left(-\frac{1}{2} \kappa_{m\perp}^2 D^2 \zeta^2 \theta_0^2 \right) d\kappa_{m\perp},$$

$$W(b, f) = \sum_{m=1}^M W_m(b, v_m, f),$$

$$W_m(b, v_m, f) \approx$$

$$\approx 2\pi I_0^2 d_m \left(\frac{4\pi^2 r_e}{k} \right)^2 \int_0^1 d\zeta \int_{2\pi f/v_{m\perp}}^{\infty} \sin^2 \left(\frac{\kappa_{m\perp}^2 d_m \zeta}{2k} \right) \times \\ \times \exp \left(\frac{2\pi i f b}{v_{m\perp}(\zeta)} \right) \frac{\kappa_{m\perp} \Phi_{Nm}(\kappa_{m\perp}, 0, \zeta)}{\sqrt{\zeta(\kappa_{m\perp}^2 v_{m\perp}^2(\zeta) - 4\pi^2 f^2)}} \times$$

$$\times \exp \left(-\frac{1}{2} \kappa_{m\perp}^2 D^2 \zeta^2 \theta_0^2 \right) d\kappa_{m\perp},$$

$$V_f(f) = \frac{2\pi f b}{\arccos(\operatorname{Re} W(b, f) / |W(b, f)|)}.$$

Здесь $M=1$ для односкоростной модели и $M=2, 3$ для двухпоточковой и трехпоточковой моделей; $W_m(v_m, f)$ и $W_m(b, v_m, f)$ обусловлены рассеянием на неоднородностях m -й области ($m=1, \dots, M$); I_0 и θ_0 – интенсивность и угловой размер источника с гауссовым распределением радиояркости; $k=2\pi f_0/c$; $\zeta=1-z/d_m$; $\vec{\kappa}_{m\perp}$ – перпендикулярная компонента волнового вектора; $\Phi_{Nm}(\kappa_{\perp}, 0, \zeta) \propto \sigma_{Nm}^2(\zeta) \kappa_{\perp}^{-n_m} \exp(\kappa_{\perp}^2 l_{0m}^2)$ – трехмерный пространственный спектр флуктуаций электронной концентрации, $\sigma_{Nm}^2(\zeta) = \sigma_{0m}^2 / (R_m(\zeta))^{2\alpha_m}$ – дисперсия флуктуаций плотности электронов вдоль луча зрения, σ_{0m}^2 – дисперсия флуктуаций плотности электронов на уровне орбиты Земли, l_{0m} – внутренний масштаб турбулентности; $v_{m\perp}(\zeta) = v_m \sin \varphi / R_m(\zeta)$, φ – угол элонгации, $R_m(\zeta)$ – радиус-вектор точки на луче зрения, а. е.; $D = \sum_{m=1}^M d_m$; b – расстояние между пунктами наблюдений (база).

Как было установлено (см., например, работы [6, 19, 26, 27]), изменение параметров солнечного ветра оказывает различное влияние на временной энергетический спектр мерцаний $W(f)$ и дисперсионную зависимость $V_f(f)$. Перпендикулярная проекция скорости v_{\perp} определяет ширину спектра мерцаний $W(f)$ и значение $V_f(f)$ на высоких спектральных частотах. Показатель степени спектра неоднородностей n характеризует наклон высокочастотной части спектра $W(f)$, а закон убывания флуктуаций электронной концентрации с расстоянием, описываемый показателем α , определяет форму низкочастотной части спектра $W(f)$. Наибольшее влияние параметр α оказывает на наклон дисперсионных кривых $V_f(f)$. В то же время показатель степени спектра неоднородностей n практически не влияет на наклон дисперсионной кривой. Все вышесказанное дает возможность восстановить параметры солнечного ветра из наблюдений межпланетных мерцаний радиисточников с известными угловыми размерами.

3. Результаты и обсуждение

Наблюдения межпланетных мерцаний проводились в 2003–2011 гг. в осенне-зимний период с сентября по апрель ежемесячно в течение одной недели на радиотелескопах УТР-2 и УРАН-2. Радиостанции ЗС 144, ЗС 154, ЗС 196, ЗС 208, ЗС 245, ЗС 254, ЗС 273, ЗС 280, ЗС 295, ЗС 303 и ЗС 380, расположенные на гелиоширотах от -1.3° до 71.8° , наблюдались в ночное время вблизи верхней кульминации при углах элонгации $82.5^\circ \leq \varphi \leq 175.4^\circ$. Определение параметров солнечного ветра проводилось путем совмещения экспериментальных спектров и дисперсионных зависимостей с расчетными спектрами и дисперсионными зависимостями. Относительная среднеквадратическая ошибка при определении параметров солнечного ветра из спектров мерцаний составила в среднем $15 \div 25\%$. При использовании для определения параметров солнечного ветра одновременно спектров и дисперсионных зависимостей дрейфовой скорости мерцаний среднеквадратическая ошибка не превышала 10% .

Дальнейший анализ скорости солнечного ветра v и параметров пространственного спектра флуктуаций электронной концентрации n и α проводился отдельно для быстрого ($v > 450$ км/с) и медленного ($v \leq 450$ км/с) солнечного ветра. При обработке результатов наблюдений быстрого солнечного ветра из рассмотрения были исключены связанные с корональными выбросами массы высокоскоростные потоки, наблюдавшиеся в 2003 г. и 2011 г. и подробно рассмотренные в работе [28]. Оставшиеся данные можно связать с квазистационарными высокоскоростными потоками из корональных дыр, располагавшихся преимущественно вблизи плоскости эклиптики. Всего для дальнейшего рассмотрения было отобрано 290 случаев наблюдения медленного солнечного ветра и 153 случая наблюдения быстрого квазистационарного солнечного ветра. Следует отметить, что вблизи максимума солнечной активности в 2003 г. чаще регистрировался быстрый солнечный ветер: квазистационарный быстрый солнечный ветер можно связать с 45% случаев наблюдений, в 30% случаев были отмечены спорадические высокоскоростные потоки, которые можно связать с корональными выбросами массы [6, 28],

и только в 25% случаев наблюдался медленный солнечный ветер. В период минимума солнечной активности в 2007–2008 гг. в 85% случаев нами был зафиксирован медленный солнечный ветер, быстрые квазистационарные потоки, связанные с корональными дырами, были отмечены в 15% случаев [6]. В остальные периоды наблюдался как быстрый, так и медленный солнечный ветер.

Полученные значения скорости медленного солнечного ветра лежат в диапазоне от 230 до 450 км/с, скорость быстрого квазистационарного солнечного ветра изменяется от 480 до 800 км/с. Значения остальных определяемых в работе параметров лежат в пределах $3.1 \leq n \leq 3.9$ и $1.1 \leq \alpha \leq 2.8$ для медленного солнечного ветра и $3.1 \leq n \leq 3.8$ и $1.6 \leq \alpha \leq 3.0$ для быстрого квазистационарного солнечного ветра. На рис. 1 и рис. 2 приведены гистограммы v , n и α для медленного и быстрого квазистационарного солнечного ветра, иллюстрирующие вариации указанных параметров. На рис. 1, а приведена гистограмма скорости v , на которой виден максимум распределения скорости при $v \approx 300$ км/с. Гистограмма значений показателя трехмерного пространственного спектра флуктуаций n приведена на рис. 1, б. Основная часть значений n лежит в интервале $3.7 \div 3.9$. На рис. 1, в показана гистограмма значений параметра α , характеризующего закон убывания флуктуаций электронной концентрации с расстоянием. Мы видим, что для медленного солнечного ветра распределение параметра α имеет выраженный максимум при $\alpha = 1.8$. На рис. 2 показаны гистограммы v , n и α для быстрого квазистационарного солнечного ветра. Можно заметить, что большая часть значений скорости v попадает в интервал $v \approx 500 \div 600$ км/с. Максимум распределения n приходится на значения $n \approx 3.5 \div 3.7$, а большая часть значений α приходится на интервал $1.9 \div 2.5$. Таким образом, максимум распределения n для быстрого солнечного ветра смещен в сторону меньших значений n по отношению к распределению n для медленного солнечного ветра. В то же время параметр α для быстрого солнечного ветра имеет более высокие значения, чем для медленного солнечного ветра.

В работе были рассчитаны также средние арифметические значения \bar{v} , \bar{n} , $\bar{\alpha}$ и ошибки

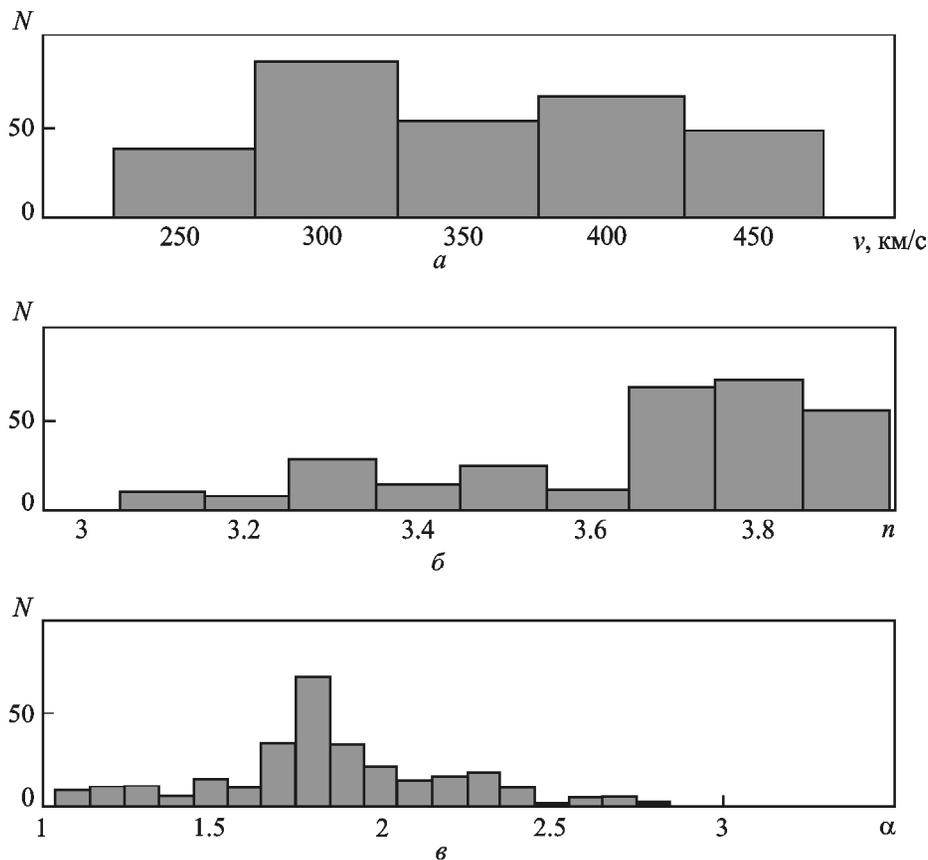


Рис. 1. Гистограммы скорости v , показателя трехмерного пространственного спектра флуктуаций n и параметра α , характеризующего закон убывания флуктуаций электронной концентрации с расстоянием, для медленного солнечного ветра по данным наблюдений на радиотелескопах УТР-2 и УРАН-2 в 2003–2011 гг.

среднего для быстрого квазистационарного и медленного солнечного ветра. Как видно из рис. 1 и рис. 2, распределение данных в группах не является гауссовым, поэтому для сравнения групп данных был использован стандартный метод непараметрической статистики – U-критерий Манна–Уитни [29]. Отличия между средними значениями \bar{v} , \bar{n} , $\bar{\alpha}$ для быстрого и медленного солнечного ветра статистически значимы. Для быстрого солнечного ветра средние за период наблюдений значения параметров составили $\bar{v}_h = 590 \pm 30$ км/с, $\bar{n}_h = 3.5 \pm 0.1$, $\bar{\alpha}_h = 2.2 \pm 0.2$. Для медленного солнечного ветра было получено $\bar{v}_s = 350 \pm 20$ км/с, $\bar{n}_s = 3.7 \pm 0.05$, $\bar{\alpha}_s = 1.8 \pm 0.1$. Найденные для медленного солнечного ветра средние значения \bar{n}_s и $\bar{\alpha}_s$ в целом соответствуют результатам работ [17, 21]. Результаты, приведенные в работе [17], были получены для малых элонгаций для периода минимума солнечной активности 2007–2009 гг., т. е. в те же периоды времени, что рассматриваются в настоящей ра-

боте и соответствуют большей части наблюдений медленного солнечного ветра. Для медленного солнечного ветра среднее значение показателя трехмерного пространственного спектра флуктуаций электронной концентрации соответствует закону Колмогорова для гидродинамической турбулентности. Для быстрого солнечного ветра характерны более низкие значения \bar{n}_h . Можно предположить, что более низкие, чем для колмогоровского спектра, значения показателя трехмерного пространственного спектра флуктуаций межпланетной турбулентности свидетельствуют о присутствии быстрых магнитозвуковых волн в межпланетной турбулентности за орбитой Земли. В целом это согласуется с наблюдениями космического аппарата *Ulysses*, согласно которым в быстром солнечном ветре турбулентность хорошо описывается законом Ирошников–Кречнана для магнитогидродинамической турбулентности вплоть до расстояний $3.5 \div 4$ а. е. от Солнца [1, 30].

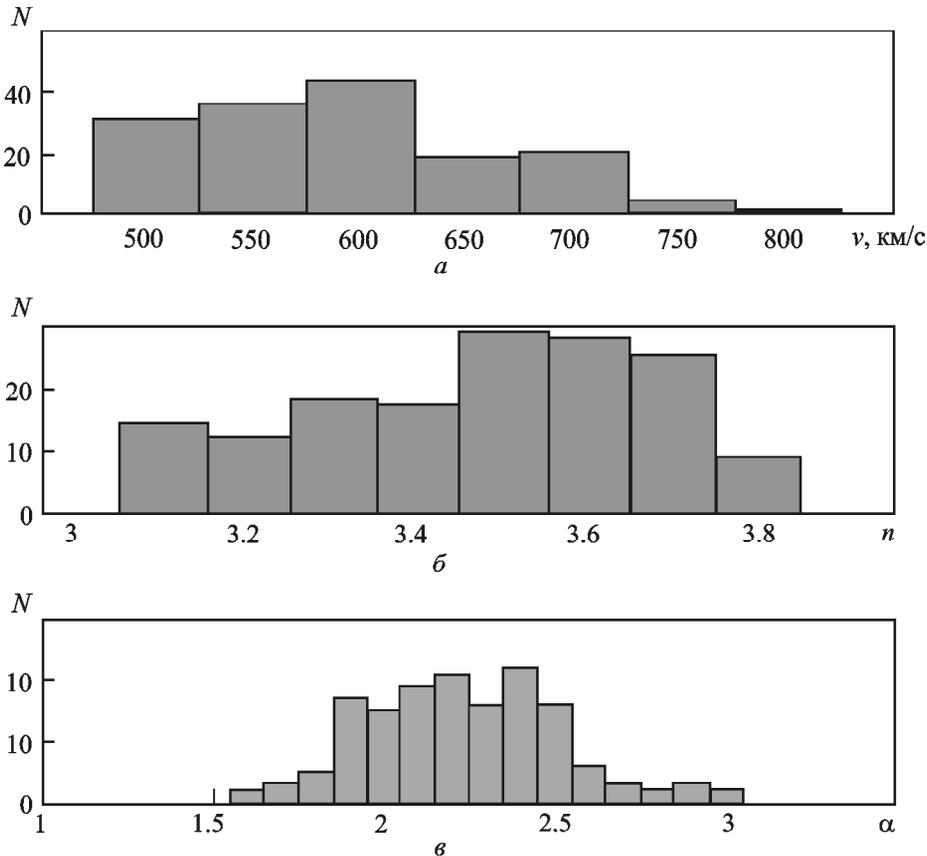


Рис. 2. Гистограммы скорости v , показателя трехмерного пространственного спектра флуктуаций n и параметра α , характеризующего закон убывания флуктуаций электронной концентрации с расстоянием, для быстрого солнечного ветра по данным наблюдений на радиотелескопах УТР-2 и УРАН-2 в 2003–2011 гг.

По данным наблюдений по аналогии с [4, 16, 21] были построены эмпирические модели спектра флуктуаций электронной концентрации $\Phi_{Ns}(\kappa_{\perp}, \theta, \zeta)$:

$$\Phi_{Ns}(\kappa_{\perp}) \propto \left(\frac{R}{R_0}\right)^{-3.6 \pm 0.2} \kappa_{\perp}^{-3.7 \pm 0.05} \quad (1)$$

для медленного солнечного ветра и

$$\Phi_{Nh}(\kappa_{\perp}) \propto \left(\frac{R}{R_0}\right)^{-4.4 \pm 0.4} \kappa_{\perp}^{-3.5 \pm 0.1} \quad (2)$$

для быстрого квазистационарного солнечного ветра.

Полученные выражения описывают эволюцию спектров флуктуаций плотности быстрого квазистационарного и медленного солнечного ветра при увеличении расстояния от Солнца. Как следует из выражений (1) и (2), $\bar{\alpha}_h > \bar{\alpha}_s$, т. е. для быстрого

солнечного ветра характерно более быстрое убывание флуктуаций электронной концентрации с расстоянием, описываемое показателем $\bar{\alpha}_h$. Следует также отметить довольно большой разброс значений как $\bar{\alpha}_h$, так и \bar{n}_h (см. рис. 2). Это может свидетельствовать о присутствии различных видов турбулентности в быстром квазистационарном солнечном ветре на расстояниях от Солнца, порядка 1 а. е. и более, а также о переменяемости турбулентности быстрого квазистационарного солнечного ветра. В то же время в медленном солнечном ветре на больших расстояниях от Солнца, так же как и на малых расстояниях (см., например, [21]), преобладающей является колмогоровская турбулентность.

4. Заключение

По результатам наблюдений межпланетных мерцаний на радиотелескопах УТР-2 и УРАН-2 исследованы вариации параметров быстрого и мед-

ленного солнечного ветра на расстояниях от Солнца порядка 1 а. е. и больше. Установлено, что для медленного солнечного ветра среднее значение показателя трехмерного пространственного спектра флуктуаций электронной концентрации соответствует закону Колмогорова для гидродинамической турбулентности с показателем трехмерного пространственного спектра флуктуаций электронной концентрации $n = 11/3$. В то же время турбулентность быстрого квазистационарного солнечного ветра хорошо описывается законом Ирошникова–Кречнана для магнитогидродинамической турбулентности с $n = 7/2$. В работе были построены также эмпирические радиальные зависимости спектров турбулентности быстрого и медленного солнечного ветра и обнаружено, что на расстояниях от Солнца, превышающих 1 а. е., для быстрого квазистационарного солнечного ветра характерно более быстрое убывание флуктуаций электронной концентрации, чем для медленного солнечного ветра. Полученные результаты демонстрируют возможность исследования межпланетной турбулентности на расстояниях от Солнца, превышающих 1 а. е., методами декаметровый радиоастрономии.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке “Целевой комплексной программы НАН Украины по научным космическим исследованиям на 2012–2016 гг.”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bruno R. and Carbone V. The solar wind as a turbulence laboratory // *Living Rev. Sol. Phys.* – 2005. – Vol. 2. – id. 4. DOI: 10.12942/lrsp-2005-4
2. Hayashi K., Kojima M., Tokumaru M., and Fujiki K. MHD tomography using interplanetary scintillation measurement // *J. Geophys. Res. Space Phys.* – 2003. – Vol. 108, Is. A3. – P. 1102–1123. DOI: 10.1029/2002JA009567
3. Jackson B. V., Hick P. L., Kojima M., and Yokobe A. Heliospheric tomography using interplanetary scintillation observations. 1. Combined Nagoya and Cambridge data // *J. Geophys. Res. Space Phys.* – 1998. – Vol. 103, Is. A6. – P. 12049–12068. DOI: 10.1029/97JA02528
4. Spangler S. R., Kavars D. W., Kortenkamp P. S., Bondi M., Mantovani F., and Alef W. Very long baseline interferometer measurements of turbulence in the inner solar wind // *Astron. Astrophys.* – 2002. – Vol. 384, No. 2. – P. 654–665. DOI: 10.1051/0004-6361:20020028
5. Fallows R. A., Breen A. R., and Dorrian G. D. Developments in the use of EISCAT for interplanetary scintillation // *Ann. Geophys.* – 2008. – Vol. 26. – P. 2229–2236. DOI: 10.5194/angeo-26-2229-2008
6. Olyak M. R. Large-scale structure of solar wind and geomagnetic phenomena // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* – 2012. – Vol. 86. – P. 34–40. DOI: 10.1016/j.jastp.2012.06.011
7. Frehlich R. G. Space-time fourth moment of waves propagating in random media // *Radio Sci.* – 1987. – Vol. 22, Is. 4. – P. 481–490. DOI: 10.1029/RS022i004p00481
8. Matthaeus W. H. and Goldstein M. L. Stationarity of magnetohydrodynamic fluctuations in the solar wind // *J. Geophys. Res. Space Phys.* – 1982. – Vol. 87, Is. A12. – P. 10347–10354. DOI: 10.1029/JA087iA12p10347
9. Burlaga L. F. and Klein L. W. Fractal structure of the interplanetary magnetic field // *J. Geophys. Res. Space Phys.* – 1986. – Vol. 91, Is. A1. – P. 347–350. DOI: 10.1029/JA091iA01p00347
10. Greco A., Matthaeus W. H., Servidio S., Chuychai P., and Dmitruk P. Statistical analysis of discontinuities in solar wind ACE data and comparison with intermittent MHD turbulence // *Astrophys. J. Lett.* – 2009. – Vol. 691, No. 2. – P. L111–L114. DOI: 10.1088/0004-637X/691/2/L111
11. Huddleston D. E., Woo R., and Neugebauer M. Density fluctuations in different types of solar wind flow at 1 AU and comparison with results from Doppler scintillation measurements near the Sun // *J. Geophys. Res. Space Phys.* – 1995. – Vol. 100, Is. A10. – P. 19951–19956. DOI: 10.1029/95JA01084
12. Alexandrova O., Lacombe C., Mangeney A., Grappin R., and Maksimovic M. Solar wind turbulent spectrum at plasma kinetic scales // *Astrophys. J.* – 2012. – Vol. 760, No. 2 – P. 121–127. DOI: 10.1088/0004-637X/760/2/121
13. Chen C. H. K., Salem C. S., Bonnell J. W., Mozer F. S., and Bale S. D. Density fluctuation spectrum of solar wind turbulence between ion and electron scales // *Phys. Rev. Lett.* – 2012. – Vol. 109, No. 3. – id. 35001.
14. Hewish A., Scott P. F., and Wills D. Interplanetary Scintillation of Small Diameter Radio Sources // *Nature.* – 1964. – Vol. 203, Is. 4951. – P. 1214–1217. DOI: 10.1038/2031214a0
15. Zhuk N. Scintillation studies of cosmic source angular structure (review) // *Radiophys. Quantum Electron.* – 1980. – Vol. 23, No. 8. – P. 597–615. DOI: 10.1007/BF01041203
16. Manoharan P. K. Three-dimensional structure of the solar wind: Variation of density with the solar cycle // *Sol. Phys.* – 1993. – Vol. 148, Is. 1. – P. 153–167. DOI: 10.1007/BF00675541
17. Glubokova S. K., Chashei I. V., and Tyul'bashev S. A. Small-scale solar wind density turbulence spectrum from interplanetary scintillation observations // *Adv. Astron. Space Phys.* – 2012. – Vol. 2, Is. 2. – P. 164–166.
18. Houminer Z. and Hewish A. Long lived sectors of enhanced density other hand, both the 34- and the 74-MHz IPS spectra were irregularities in the solar wind // *Planet. Space Sci.* – 1972. – Vol. 20, Is. 10. – P. 1703–1716. DOI: 10.1016/0032-0633(72)90192-4
19. Пынзарь А. В., Шишов В. И., Шишова Т. Д. Энергетические спектры межпланетных мерцаний // *Астрономический журнал.* – 1975. – Т. 52, № 6. – С. 1187–1194.

20. Gotwols B. L., Mitchell D. G., Roelof E. C., Cronyn W. M., Shawhan S. D., and Erickson W. C. Synoptic analysis of interplanetary radio scintillation spectra observed at 34 MHz // *J. Geophys. Res. Space Phys.* – 1978. – Vol. 83, Is. A9. – P. 4200–4212. DOI: 10.1029/JA083iA09p04200
21. Spangler S. R. and Sakurai T. Radio interferometer observations of solar wind turbulence from the orbit of HELIOS to the solar corona // *Astrophys. J.* – 1995. – Vol. 445, No. 2. – P. 999–1016. DOI: 10.1086/175758
22. Fujiki K., Kojima M., Tokumaru M., Ohmi T., Yokobe A., Hayashi K., McComas D. J., and Elliott H. A. How did the solar wind structure change around the solar maximum? From interplanetary scintillation observation // *Ann. Geophys.* – 2003. – Vol. 21, No. 6. – P. 1257–1261. DOI: 10.5194/angeo-21-1257-2003
23. Фалькович И. С., Коноваленко А. А., Калинин Н. Н., Оляк М. Р., Гридин А. А., Бубнов И. Н., 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.
24. Фалькович И. С., Оляк М. Р., Калинин Н. Н., Бубнов И. Н. Связь между вариациями параметров солнечного ветра и индексом геомагнитной активности *Ar* в 2003–2005 гг. // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2011. – Т. 16, № 1. – С. 15–21.
25. Фалькович И. С., Калинин Н. Н., Коноваленко А. А., Яцкив Я. С., Литвиненко Л. Н., Мельник В. Н., Оляк М. Р., Доровский В. В., Браженко А. И., Литвиненко О. А., Бубнов И. Н., Гридин А. А., Соловьев В. В. Система декаметровых радиотелескопов УРАН как инструмент для исследований космической погоды // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2011. – Т. 16, № 2. – С. 144–153.
26. Оляк М. Р., Калинин Н. Н., Коноваленко А. А., Браженко А. И. Применение спектрального и дисперсионного анализа в декаметровом диапазоне радиоволн для определения параметров солнечного ветра // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2014. – Т. 19, № 2. – С. 120–125.
27. Olyak M. R. The dispersion analysis of drift velocity in the study of solar wind flows // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* – 2013. – Vol. 102. – P. 185–191. DOI: 10.1016/j.jastp.2013.05.016
28. Оляк М. Р. Быстрый солнечный ветер и геомагнитная активность // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2015. – Т. 20, № 1. – С. 3–9.
29. Боровиков В. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере: Для профессионалов. 2-е изд. – Санкт-Петербург: Питер, 2003. – 688 с.
30. Roberts D. A. Evolution of the spectrum of solar wind velocity fluctuations from 0.3 to 5 AU // *J. Geophys. Res. Space Phys.* – 2010. – Vol. 115, Is. A12. – id. A12101. DOI: 10.1029/2009JA015120
2. HAYASHI, K., KOJIMA, M., TOKUMARU, M. and FUJIKI, K., 2003. MHD tomography using interplanetary scintillation measurement. *J. Geophys. Res. Space Phys.* vol. 108, is. A3, pp. 1102–1123. DOI: 10.1029/2002JA009567
3. JACKSON, B. V., HICK, P. L., KOJIMA, M. and YOKOBE, A., 1998. Heliospheric tomography using interplanetary scintillation observations. 1. Combined Nagoya and Cambridge data. *J. Geophys. Res. Space Phys.* vol. 103, is. A6, pp. 12049–12068. DOI: 10.1029/97JA02528
4. SPANGLER, S. R., KAVARS, D. W., KORTENKAMP, P. S., BONDI, M., MANTOVANI, F. and ALEF, W., 2002. Very long baseline interferometer measurements of turbulence in the inner solar wind. *Astron. Astrophys.* vol. 384, no. 2, pp. 654–665. DOI: 10.1051/0004-6361:20020028
5. FALLOWS, R. A., BREEN, A. R. and DORRIAN, G. D., 2008. Developments in the use of EISCAT for interplanetary scintillation. *Ann. Geophys.* vol. 26, pp. 2229–2236. DOI: 10.5194/angeo-26-2229-2008
6. OLYAK, M. R., 2012. Large-scale structure of solar wind and geomagnetic phenomena. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* vol. 86, pp. 34–40. DOI: 10.1016/j.jastp.2012.06.011
7. FREHLICH, R. G., 1987. Space-time fourth moment of waves propagating in random media. *Radio Sci.* vol. 22, is. 4, pp. 481–490. DOI: 10.1029/RS022i004p00481
8. MATTHAEUS, W. H. and GOLDSTEIN, M. L., 1982. Stationarity of magnetohydrodynamic fluctuations in the solar wind. *J. Geophys. Res. Space Phys.* vol. 87, is. A12, pp. 10347–10354. DOI: 10.1029/JA087iA12p10347
9. BURLAGA, L. F. and KLEIN, L. W., 1986. Fractal structure of the interplanetary magnetic field. *J. Geophys. Res. Space Phys.* vol. 91, is. A1, pp. 347–350. DOI: 10.1029/JA091iA01p00347
10. GRECO, A., MATTHAEUS, W. H., SERVIDIO, S., CHUYCHAI, P. and DMITRUK, P., 2009. Statistical analysis of discontinuities in solar wind ACE data and comparison with intermittent MHD turbulence. *Astrophys. J. Lett.* vol. 691, no. 2, pp. L111–L114. DOI: 10.1088/0004-637X/691/2/L111
11. HUDDLESTON, D. E., WOO, R. and NEUGEBAUER, M., 1995. Density fluctuations in different types of solar wind flow at 1 AU and comparison with results from Doppler scintillation measurements near the Sun. *J. Geophys. Res. Space Phys.* vol. 100, is. A10, pp. 19951–19956. DOI: 10.1029/95JA01084
12. ALEXandrova, O., Lacombe, C., Mangeney, A., Grappin, R. and Maksimovic, M., 2012. Solar wind turbulent spectrum at plasma kinetic scales. *Astrophys. J.* vol. 760, no. 2, pp. 121–127. DOI: 10.1088/0004-637X/760/2/121
13. CHEN, C. H. K., SALEM, C. S., BONNELL, J. W., MOZER, F. S. and BALE, S. D., 2012. Density fluctuation spectrum of solar wind turbulence between ion and electron scales. *Phys. Rev. Lett.* vol. 109, no. 3, 35001.
14. HEWISH, A., SCOTT, P. F. and WILLS, D., 1964. Interplanetary scintillation of small diameter radio sources. *Nature.* vol. 203, is. 4951, pp. 1214–1217. DOI: 10.1038/2031214a0

REFERENCES

1. BRUNO, R. and CARBONE, V., 2005. The solar wind as a turbulence laboratory. *Living Rev. Sol. Phys.* vol. 2, id. 4. – DOI: 10.12942/lrsp-2005-4

15. ZHUK, N., 1980. Scintillation studies of cosmic source angular structure (review). *Radiophys. Quantum Electron.* vol. 23, no. 8, pp. 597–615. DOI: 10.1007/BF01041203
16. MANOHARAN, P. K., 1993. Three-dimensional structure of the solar wind: Variation of density with the solar cycle. *Sol. Phys.* vol. 148, is. 1, pp. 153–167. DOI: 10.1007/BF00675541
17. GLUBOKOVA, S. K., CHASHEI, I. V. and TYUL'BASHEV, S. A., 2012. Small-scale solar wind density turbulence spectrum from interplanetary scintillation observations. *Adv. Astron. Space Phys.* vol. 2, is. 2, pp. 164–166.
18. HOUMINER, Z. and HEWISH, A., 1972. Long lived sectors of enhanced density other hand, both the 34- and the 74-MHz IPS spectra were irregularities in the solar wind. *Planet. Space Sci.* vol. 20, is. 10, pp. 1703–1716. DOI: 10.1016/0032-0633(72)90192-4
19. PYNZAR, A. V., SHISHOV, V. I. and SHISHOVA T. D., 1975. Power spectra of interplanetary scintillations. *Astronomicheskii Zhurnal.* vol. 52, no. 6, pp. 1187–1194 (in Russian).
20. GOTWOLS, B. L., MITCHELL, D. G., ROELOF, E. C., CRONYN, W. M., SHAWHAN, S. D. and ERICKSON, W. C., 1978. Synoptic analysis of interplanetary radio scintillation spectra observed at 34 MHz // *J. Geophys. Res. Space Phys.* vol. 83, is. A9. – P. 4200–4212. DOI: 10.1029/JA083iA09p04200
21. SPANGLER, S. R. and SAKURAI, T., 1995. Radio interferometer observations of solar wind turbulence from the orbit of HELIOS to the solar corona. *Astrophys. J.* vol. 445, no. 2, pp. 999–1016. DOI: 10.1086/175758
22. FUJIKI, K., KOJIMA, M., TOKUMARU, M., OHMI, T., YOKOBE, A., HAYASHI, K., McCOMAS, D. J. and ELLIOTT, H. A., 2003. How did the solar wind structure change around the solar maximum? From interplanetary scintillation observation. *Ann. Geophys.* vol. 21, no. 6, pp. 1257–1261. DOI: 10.5194/angeo-21-1257-2003
23. FALCOVICH, I. S., KONOVALENKO, A. A., KALINICHENKO, N. N., OLYAK, M. R., GRIDIN, A. A., BUBNOV, I. N., LECACHEUX, A. and RUCKER, H. O., 2006. Variations of Parameters of Solar Wind Stream Structure outside 1 AU in 2003–2004. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 11, no. 1, pp. 31–41 (in Russian).
24. FALCOVICH, I. S., OLYAK, M. R., KALINICHENKO, N. N. and BUBNOV, I. N., 2011. Association between Variations of the Solar Wind Parameters and Geomagnetic Activity Index *Ap* in 2003–2005. *Radio Physics and Radio Astronomy.* vol. 2, no 3, pp. 205–210. DOI: 10.1615/RadioPhysicsRadioAstronomy.v2.i3.20
25. FALCOVICH, I. S., KALINICHENKO, N. N., KONOVALENKO, A. A., YATSKIV, Y. S., LYTVYENENKO, L. M., MELNIK, V. N., OLYAK, M. R., DOROVSKYY, V. V., BRAZHENKO, A. I., LYTVYENENKO, O. A., BUBNOV, I. N., GRIDIN, A. A. and SOLOV'EV, V. V., 2011. The URAN Decameter Radiotelescope System as an Instrument for Space Weather Investigations. *Radio Physics and Radio Astronomy.* vol. 2, no. 4, pp. 307–314. DOI: 10.1615/RadioPhysicsRadioAstronomy.v2.i4.30
26. OLYAK, M. R., KALINICHENKO, N. N., KONOVALENKO, A. A. and BRAZHENKO, A. I., 2014. Application of Spectral and Dispersion Techniques at the Decameter Wavelengths for Determination of Solar Wind Parameters. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 19, no. 2, pp. 120–125 (in Russian).
27. OLYAK, M. R., 2013. The dispersion analysis of drift velocity in the study of solar wind flows. *J. Atmos. Sol-Terr. Phys.* vol. 102, pp. 185–191. DOI: 10.1016/j.jastp.2013.05.016
28. OLYAK, M. R., 2015. High-Speed Solar Wind and Geomagnetic Activity. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 20, no. 1, pp. 3–9 (in Russian).
29. BOROVNIKOV, V., 2003. *STATISTICA: The Art of Computer Data Analysis for Professionals.* St. Petersburg, Russia: Piter Publ. (in Russian).
30. ROBERTS, D. A., 2010. Evolution of the spectrum of solar wind velocity fluctuations from 0.3 to 5 AU. *J. Geophys. Res. Space Phys.* vol. 115, is. A12, id. A12101. DOI: 10.1029/2009JA015120

M. R. Olyak¹, N. N. Kalinichenko¹, A. A. Konovalenko¹, A. I. Brazhenko², and I. N. Bubnov¹

¹ Institute of Radio Astronomy,
National Academy of Sciences of Ukraine,
4, Mystetstv St., Kharkiv, 61002, Ukraine

² Poltava Gravimetric Observatory,
S. Subotin Institute of Geophysics,
National Academy of Sciences of Ukraine,
27/29, Miasoiedov St., Poltava, 36029, Ukraine

SPECTRUM OF THE INTERPLANETARY PLASMA TURBULENCE AT A DISTANCE FROM THE SUN GREATER THAN 1 AU

Purpose: Making analysis of variations of fast and slow solar wind parameters at distances from the Sun of about 1 AU and more.

Design/methodology/approach: The method of Feynman path integrals is applied to calculate the temporal spectra and dispersion dependences of the drift velocity of interplanetary scintillations. The calculated spectra and dispersion dependences have been compared with the experimental ones to determine the solar wind parameters.

Findings: The parameters of fast and slow solar wind are determined and obtained data analyzed by the results of observations with the UTR-2 and URAN-2 radio telescopes made in 2003–2011. Based on these results, the empirical radial dependences of the turbulence spectra for fast and slow solar wind have been built.

Conclusions: The slow solar wind turbulence is shown on the average corresponding to the Kolmogorov law of hydrodynamic turbulence. The turbulence of fast quasi-stationary solar wind is well described by the Iroshnikov–Kraichnan magnetohydrodynamic turbulence.

Key words: interplanetary scintillation, fast and slow solar wind, three-dimensional spatial spectrum of electron density fluctuations

М. Р. Оляк¹, М. М. Калініченко¹, О. О. Коноваленко¹,
А. І. Браженко², І. М. Бубнов¹

¹Радіоастрономічний інститут НАН України,
вул. Мистецтв, 4, м. Харків, 61002, Україна

²Полтавська гравіметрична обсерваторія
Інституту геофізики ім. С. І. Суботіна НАН України,
вул. М'ясоєдова, 27/29, м. Полтава, 36029, Україна

СПЕКТР ТУРБУЛЕНТНОСТІ МІЖПЛАНЕТНОЇ ПЛАЗМИ НА ВІДСТАНЯХ ВІД СОНЦЯ ПОНАД 1 А. О.

Предмет і мета роботи: Аналізуються варіації параметрів сонячного вітру на відстанях від Сонця близько 1 а. о. та більше.

Методи і методологія: Метод фейнманівських інтегралів за траєкторіями був застосований для обчислення часових спектрів і дисперсійних залежностей дрейфової швидкості міжпланетних мерехтінь. Отримані вирази були використані для зіставлення з експериментальними спектрами та диспер-

сійними залежностями дрейфової швидкості і визначення параметрів сонячного вітру.

Результати: За даними спостережень на радіотелескопах УТР-2 і УРАН-2 в 2003–2011 рр. визначено параметри швидкого й повільного сонячного вітру та виконано аналіз отриманих даних. Побудовано емпіричні радіальні залежності спектрів турбулентності швидкого й повільного сонячного вітру.

Висновок: Показано, що турбулентність повільного сонячного вітру добре описується законом Колмогорова для гідродинамічної турбулентності, турбулентність швидкого квазістаціонарного сонячного вітру описується законом Ірошнікова–Кречнана для магнітогідродинамічної турбулентності.

Ключові слова: міжпланетні мерехтіння, швидкий і повільний сонячний вітер, тривимірний просторовий спектр флуктуацій електронної концентрації

Статья поступила в редакцию 08.08.2016