

## Вариации параметров струйной структуры солнечного ветра на расстояниях более 1 а. е. в 2003-2004 гг.

И. С. Фалькович, А. А. Коноваленко, Н. Н. Калиниченко,  
М. Р. Оляк, А. А. Гридин, И. Н. Бубнов, А. Лекашо<sup>1</sup>, Х. О. Рукер<sup>2</sup>

*Радиоастрономический институт НАН Украины,  
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина  
E-mail: akonov@ira.kharkov.ua, falk@ira.kharkov.ua, kalinich@ira.kharkov.ua*

<sup>1</sup>*Парижская обсерватория, Медон, Франция  
E-mail: alain.lecacheux@obspm.fr*

<sup>2</sup>*Институт космических исследований, Грац, Австрия  
E-mail: helmut.ruker@oeaw.ac.at*

*Статья поступила в редакцию 17 ноября 2005 г.*

Приведены результаты двухлетних исследований межпланетных мерцаний космических радиоисточников в декаметровом диапазоне волн на элонгациях  $90 \div 170^\circ$ . С использованием двухскоростной модели среды определены наиболее вероятные значения показателей степени пространственного спектра турбулентности, ширины потоков и их скоростей. Показана возможность изучения спорадических процессов в межпланетной среде на примерах наблюдений ударных волн от солнечных вспышек и высокоскоростных потоков из корональных дыр.

### Введение

К настоящему времени накоплены обширные данные о параметрах и динамике межпланетной среды. По современным представлениям солнечный ветер в районе орбиты Земли имеет струйную структуру и является непрерывной последовательностью крупномасштабных взаимодействующих потоков, возникающих в результате вспышек, корональных дыр, исчезающих волокон и некоторых других явлений на Солнце [1]. Пространственные масштабы неоднородности межпланетной плазмы изменяются в пределах от десятков километров (внутренний масштаб пространственного спектра турбулентности) до  $0.2 \div 1.0$  а. е., что соответствует продольным и поперечным размерам крупномасштабных возмущений, вызванных мощными солнечными вспышками и выбросами корональных масс. Экспериментально доказано, что неоднородности электронной концен-

трации имеют степенной пространственный спектр, показатель которого меняется с расстоянием от Солнца в диапазоне  $2.9 \div 3.9$ . Соответственно варьируются и временные масштабы наблюдаемых параметров солнечного ветра: от долей секунды (высоко-частотная область спектра мерцаний) до нескольких месяцев (долгоживущие высокоскоростные потоки из корональных дыр, вращающиеся вместе с Солнцем). Скорости отдельных потоков также меняются в широких пределах,  $300 \div 900$  км/с, а в случае мощных хромосферных вспышек могут превышать  $1000$  км/с [2]. Применение метода дисперсионного анализа к межпланетным мерцаниям позволило установить значительный разброс скоростей в мгновенной картине солнечного ветра на луче зрения, причем функция распределения скоростей может претерпевать значительные изменения ото дня ко дню [3].

Приведенные данные о характеристиках солнечного ветра получены в результате многолетних экспериментов, включающих ракетные измерения, радиопросвечивание межпланетной среды сигналами космических аппаратов (КА) и дискретных космических источников. Следует сказать, что основной объем данных относится к изучению солнечного ветра на радиальных расстояниях  $R$  от нескольких радиусов Солнца до 1 а. е. Дальних космических миссий за последние годы было немного, можно отметить прямые измерения на КА “Пионер-10, 11”, “Вояджер-1, 2”, позволившие проследить изменения параметров межпланетной среды на расстояниях до 90 а. е. Эксперименты по радиопросвечиванию с помощью КА “Венера-10, 15, 16” и “Викинг-1” [4] дали возможность детально исследовать область ускорения солнечного ветра в интервале  $R = 9 \div 25$  радиусов Солнца. Наблюдения межпланетных мерцаний космических радиоисточников проводились преимущественно в диапазоне метровых и более коротких длин волн на элонгациях, не превышающих  $90^\circ$ . Декаметровый диапазон использовался менее активно [5], хотя именно он позволяет исследовать наиболее удаленные от Солнца области межпланетной среды на элонгациях  $90 \div 170^\circ$ .

Настоящая работа посвящена двухлетним исследованиям межпланетных мерцаний с помощью крупнейшего декаметрового радиотелескопа УТР-2 [6] и новой широкополосной аппаратуры [7]. Обработка спектров мерцаний проводилась с использованием теории, учитывающей протяженность среды на луче зрения.

### Методика определения параметров солнечного ветра

Определение параметров солнечного ветра проводилось путем сопоставления полученных из эксперимента спектров межпланетных мерцаний теоретическому расчету. При больших углах элонгации,  $\phi \geq 90^\circ$ , в декаметровом диапазоне радиоволн рас-

сеивающий слой является существенно протяженным, при этом наиболее плотный слой плазмы расположен вблизи наблюдателя. В этом случае оправдано использование модели протяженной среды и методов теории многократного рассеяния (см., например, [8]) и, в частности, таких методов, как метод плавных возмущений и близкий к нему метод фейнмановских интегралов по траекториям в режиме слабого рассеяния [9, 10].

Предположим, что в слое локально однородной турбулентной плазмы со средней плотностью электронов  $N(R)$ , плавно убывающей с расстоянием от Солнца  $R$ , и флуктуациями плотности  $\delta N(\vec{\rho}, z)$ ,  $\vec{\rho} = \{x, y\}$ , вдоль оси  $z$  распространяется монохроматическое излучение от удаленного космического радиоисточника с гауссовым распределением яркости и угловым размером  $\theta$ . Поскольку в межпланетной среде неоднородности диэлектрической проницаемости являются крупномасштабными по сравнению с длиной волны [11], для медленно меняющейся комплексной амплитуды поля  $U(\omega, \rho, z)$  имеет место уравнение:

$$2ik \frac{\partial U}{\partial z} + \Delta_{\perp} U + k^2 [\langle \epsilon \rangle - 1] U + k^2 \delta \epsilon U = 0.$$

Здесь  $k = \omega/c$ ,  $\Delta_{\perp} = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ ,  $\langle \epsilon \rangle = 1 - \omega_p^2 / \omega^2$ ,  $\langle \epsilon \rangle \equiv \langle \epsilon(R) \rangle$ ,  $R = (R_0^2 + z^2 - 2R_0 z \cos \phi)^{1/2}$ ,  $R_0 = 1$  а. е.,  $\delta \epsilon \approx 4\pi e^2 \delta N(\vec{\rho}, z) / (m\omega^2)$ ,  $\omega_p$  – плазменная частота,  $\omega = 2\pi f_s$  – частота падающего на слой излучения. Вслед за [12] будем считать, что нестационарностью процесса в первом приближении можно пренебречь, поскольку внешний масштаб турбулентности  $L_0$  значительно превышает размер первой зоны Френеля [11]. Воспользуемся гипотезой локальной вмороженности неоднородностей [3], предполагающей, что относительные движения среды не сопровождаются изменениями локальной конфигурации, и введем скорость переноса неоднородностей перпендикулярно лучу зрения  $\vec{v}_{\perp} = \vec{\rho}/t$ . Определим временные корреляционные функции флуктуаций интенсивности как

$$B(t, z) = \langle U(0, z)U^*(0, z)U^*(t, z)U(t, z) \rangle - \langle U(0, z)U^*(0, z) \rangle \langle U^*(t, z)U(t, z) \rangle$$

и частотные спектры мерцаний как  $W(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} B(t, z) \exp(i2\pi ft) dt$  [3].

В работах [10, 13] была обоснована возможность применения метода фейнмановских интегралов по траекториям для интерпретации наблюдений мерцаний космических радиоисточников декаметрового диапазона на неоднородностях межпланетной плазмы при больших углах элонгации и получены выражения для временных корреляционных функций и энергетических спектров мерцаний. Для нормированного частотного спектра слабых межпланетных мерцаний в приближении марковского случайного процесса следует:

$$W(f) \approx 2\pi^2 \frac{L\omega_p^4}{(c\omega)^2} \int_0^1 d\zeta \int_a^\infty \kappa_\perp d\kappa_\perp \left[ 1 - \cos(\kappa_\perp L \zeta^2 / k) \right] \times \exp \left[ -\frac{1}{2} (\kappa_\perp L \zeta \theta)^2 \right] \frac{\Phi_N(\kappa_\perp, 0)}{[\kappa_\perp^2 v_\perp^2 - 4\pi^2 f^2]^{1/2}}. \quad (1)$$

Пространственный спектр неоднородностей электронной концентрации  $\Phi_N(\kappa_\perp, 0)$  предполагаем степенным и изотропным [11]:

$$\Phi_N(\kappa_\perp, 0) \propto \sigma_N^2(\zeta) \exp(-\kappa_\perp^2 l_0^2) L_0^{3-n} \kappa_\perp^{-n}.$$

Здесь  $a = 2\pi f / v_\perp$ ;  $\zeta = z/L$ ,  $L$  – толщина слоя;  $v_\perp \equiv v_\perp(\zeta) = v \sin \phi / (R(\zeta)/R_0)$ ;  $\kappa_\perp = |\vec{\kappa}_\perp|$ ,  $\vec{\kappa}_\perp = \{\kappa_x, \kappa_y\}$ ;  $\sigma_N^2(\zeta)$  – дисперсия относительных флуктуаций электронной концентрации  $\delta N^2 / \langle N \rangle^2$ ;  $L_0$ ,  $l_0$  – внешний и внутренний масштабы турбулентности.

Разработанная методика была применена для интерпретации результатов просвечивания радиоисточниками малых угловых размеров областей межпланетной плазмы при радиальных расстояниях  $R \geq 1$  а. е. в дека-

метровом диапазоне радиоволн. Для сравнения с экспериментом наряду с обычной моделью сферически симметричного солнечного ветра со средней скоростью  $v$ , показателем трехмерного спектра флуктуаций плотности электронов  $n$ , убывающих с расстоянием от Солнца как  $\sigma_N(\zeta) \propto R^{-b}$  ( $b \approx 2$  [11],  $R \equiv R(\zeta)$  – расстояние точки на луче зрения от Солнца), была использована также более сложная двухпоточковая модель [3]. Предполагается, что на фоне близкого к сферически симметричному солнечного ветра распространяется высокоскоростной поток. При этом луч зрения пересекают два потока: медленный с параметрами  $v_1$ ,  $n_1$ ,  $b_1$  и быстрый с  $v_2$ ,  $n_2$  и  $\sigma_N(\zeta) \propto [R_0 + L\zeta]^{-b_2}$ , где  $0 \leq \zeta \leq 1$ . Тогда спектр слабых мерцаний можно представить в виде суммы  $W_\Sigma(f) = C_1 W(f, v_1, n_1, b_1) + C_2 W(f, v_2, n_2, b_2)$  [3], где  $W(f, v_1, n_1, b_1)$  и  $W(f, v_2, n_2, b_2)$  определяются из выражения (1). Предполагалось, что мощности потоков приблизительно равны ( $C_1 \approx C_2$ ), что не противоречит известным из наблюдений параметрам медленного и быстрого солнечного ветра (см., например, [14]) и позволяет упростить задачу. Присутствие на луче зрения существенно отличающихся по мощности потоков эквивалентно незначительному искажению параметров потока с большей мощностью. В этом случае также можно использовать односкоростную модель, близкую к сферически симметричной.

### Анализ результатов наблюдений спектров мерцаний

Разработанная методика была использована для интерпретации результатов радиопросвечивания межпланетной среды космическими источниками на удалениях от Солнца более 1 а. е. Наблюдения проводились на радиотелескопе УТР-2, оснащенный трехполосным корреляционным радиометром с общей полосой пропускания 2.4 МГц и постоянной времени 0.1 с. Как показали предварительные исследования [7], ширина полосы частотной корреляции межпланетных мерцаний в диапазоне 20 ÷ 30 МГц составляет не менее 10 МГц. Мерцания

на неоднородностях ионосферы чаще всего скоррелированы в заметно более узкой полосе,  $1 \div 3$  МГц [15], что использовалось в качестве дополнительного критерия для разделения двух типов мерцаний при отборе первичных данных для построения энергетических спектров.

Для просвечивания межпланетной плазмы необходимо подбирать источники малых угловых размеров, в качестве которых обычно используют квазары и компактные детали в остатках вспышек сверхновых звезд. За исключением наиболее мощной компактной детали в Крабовидной туманности ЗС144, плотность потока  $S$  которой на частоте 25 МГц около 1000 Ян, другие компактные источники имеют существенно меньшие значения  $S \sim 100$  Ян. Представляет интерес оценить величину  $S$ , необходимую для построения спектра мерцаний в динамическом диапазоне не менее двух порядков относительно уровня спектральной плотности аддитивного шума, что позволит качественно провести последующий анализ и сравнить экспериментальные спектры с расчетными.

Энергетические спектры сигнала и шума аппроксимируем степенной функцией вида

$$W(f) = \frac{1}{1 + (f/F)^\alpha}. \quad (2)$$

Для аддитивного шума  $\alpha_{\text{ш}} = 2$  и  $F_{\text{ш}} = 1/2\pi\tau$ ,  $\tau$  – постоянная времени РС-интегратора. Для сигнала межпланетных мерцаний  $\alpha_{\text{м}} = 2 \div 4$ . Тогда для спектров вида (2) несложно получить выражение для динамического диапазона спектра мерцаний:

$$\frac{W_{\text{м}}(0)}{W_{\text{ш}}(0)} = \gamma \frac{\sigma_{\text{м}}^2 F_{\text{ш}}}{\sigma_{\text{ш}}^2 F_{\text{м}}} = \frac{\gamma}{2\pi\tau F_{\text{м}}} \frac{\sigma_{\text{м}}^2}{\sigma_{\text{ш}}^2},$$

где коэффициент  $\gamma = 1 \div 1.4$  в зависимости от наклона спектра мерцаний  $\alpha_{\text{м}} = 2 \div 4$ .

Используя известные выражения:  $\sigma_{\text{м}}^2 = m^2 S^2 A_{\text{эф}}^2 / 4k^2$  и  $\sigma_{\text{ш}}^2 = T_{\text{сист}}^2 / \Delta f \tau$  ( $k$  – постоянная Больцмана,  $A_{\text{эф}}$  – эффективная площадь радиотелескопа УТР-2 на частотах  $20 \div 30$  МГц,  $m$  – индекс мерцаний,  $T_{\text{сист}}$  – шумовая температура системы,  $\Delta f$  – полоса пропускания радиометра), получим:

$$\frac{W_{\text{м}}(0)}{W_{\text{ш}}(0)} = \gamma \frac{m^2 S^2 A_{\text{эф}}^2 \Delta f}{4k^2 T_{\text{сист}}^2 2\pi F_{\text{м}}}.$$

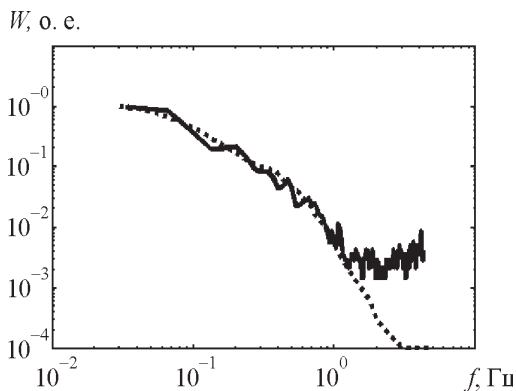
Полагая, что  $W_{\text{м}}(0)/W_{\text{ш}}(0) = 10^2$  и  $\gamma = 1.2$ , оценим плотность потока источника:

$$S = 46 \frac{k T_{\text{сист}}}{m A_{\text{эф}}} \sqrt{\frac{F_{\text{м}}}{\Delta f}}.$$

При  $A_{\text{эф}} = 10^5 \text{ м}^2$ ,  $m = 0.1$ ,  $T_{\text{сист}} = 3.8 \cdot 10^4 \text{ К}$ ,  $\Delta f = 2.4 \text{ МГц}$  и  $F_{\text{м}} = 0.3 \text{ Гц}$  плотность потока  $S = 85 \text{ Ян}$ . Таким образом, необходимо выбирать для наблюдений компактные источники с плотностью потока  $S \geq 85 \text{ Ян}$ . По данным работы [5], мерцающих источников с такой плотностью потока и разными гелиоцентрическими координатами не менее 15, что позволяет эффективно изучать межпланетную среду как в плоскости эклиптики, так и на высоких гелиоширотах на элонгациях от  $90$  до  $170^\circ$ .

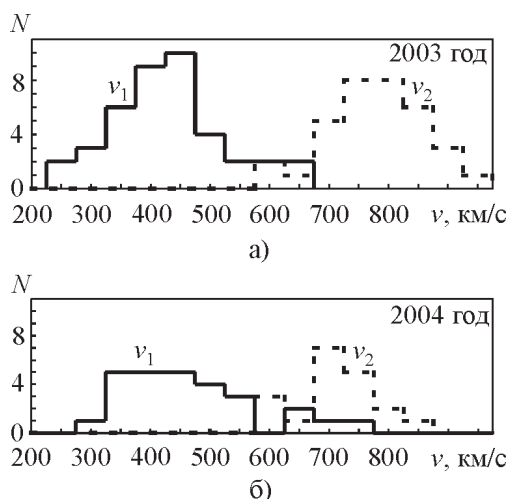
Пример совмещения экспериментального спектра мерцаний с расчетным для двухскоростной модели солнечного ветра приведен на рис. 1. В соответствии с описанной выше методикой определяются шесть параметров струйной структуры:  $n_{1,2}$ ,  $b_{1,2}$ ,  $v_{1,2}$  с характерными ошибками  $\pm 0.2$ ,  $\pm 0.3$  и  $\pm 50 \text{ км/с}$  соответственно. Достаточно большие ошибки оцениваемых параметров типичны для рассматриваемой обратной задачи.

Результаты статистического анализа вариаций параметров межпланетной среды в 2003–2004 гг. иллюстрируют приведенные ниже гистограммы, построенные с использованием всех наблюдавшихся радиоисточников: ЗС144, ЗС196, ЗС254, ЗС273, ЗС280



**Рис. 1.** Экспериментальный спектр мерцаний и расчетный спектр для двухпотоковой модели солнечного ветра:  $n_1 = 3.7$ ,  $b_1 = 1.6$ ,  $v_1 = 400$  км/с;  $n_2 = 3.6$ ,  $b_2 = 3.2$ ,  $v_2 = 850$  км/с

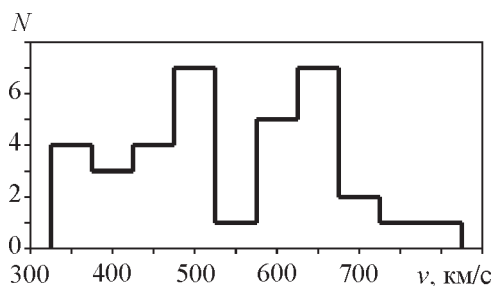
и ЗС380. На рис. 2 показана гистограмма скоростей, имеющая выраженные максимумы  $v_1 = 450$  км/с,  $v_2 = 800$  км/с в 2003 г. и  $v_1 = 400$  км/с,  $v_2 = 700$  км/с в 2004 г. Рассматриваемые два года характеризовались спадом солнечной активности (средние значения чисел Вольфа  $W_n = 65$  в 2003 г. и  $W_n = 35$  в 2004 г.). Можно отметить большие в среднем значения скоростей  $v_1$  и  $v_2$  в 2003 г., когда солнечная активность была выше. Кроме того, в этом же году практически все исследованные спектры мерцаний описывались



**Рис. 2.** Гистограмма скоростей солнечного ветра на больших элонгациях в период с 2003 по 2004 гг.

двухпотоковой моделью, содержащей струю со скоростью  $v_2$ , тогда как в 2004 г. высокоскоростные потоки наблюдались лишь в 50 % случаев и удельный вес низких скоростей,  $v_1 = 350 \div 400$  км/с, был достаточно велик. Тем самым и в случае больших расстояний от Солнца,  $R > 1$  а. е., подтверждается вывод работ [16, 17] для  $R < 1$  а. е. об уменьшении средних скоростей и числа высокоскоростных потоков в годы пониженной солнечной активности. Сколько-нибудь заметного снижения максимальных значений скорости  $v_{2max} = 700 \div 900$  км/с при  $R > 1$  а. е. также не наблюдается.

На рис. 3 приведена гистограмма скоростей солнечного ветра в совпадающие с нашими экспериментами дни 2003 г., которая построена по данным, полученным вблизи орбиты Земли КА SOHO [18]. Распределение скоростей также имеет два максимума  $v_1 = 500$  км/с и  $v_2 = 650$  км/с, однако по сравнению с данными радиопросвечивания на рис. 2 наблюдаются большие значения  $v_1$  и меньшие значения  $v_2$ . Это можно объяснить локальностью ракетных измерений параметров межпланетной плазмы (только в плоскости эклиптики), приводящей к уменьшению разброса скоростей. В случае наблюдения межпланетных мерцаний на больших элонгациях вклад в анализируемые энергетические спектры вносит, как показали расчеты, среда на луче зрения протяженностью в несколько а. е. При таких больших пространственных масштабах и с учетом наблюдений высокоширотных источников вероят-

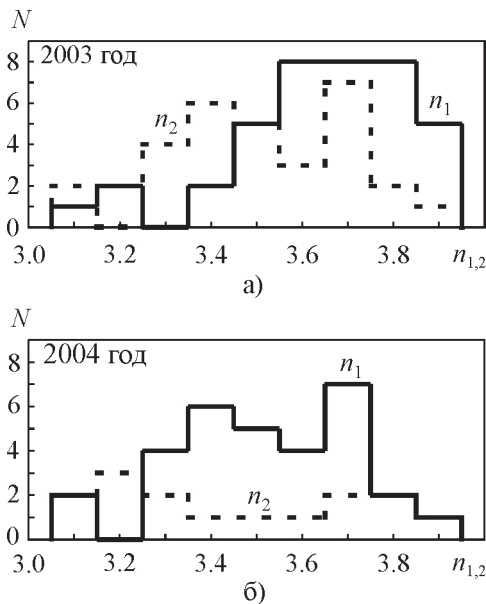


**Рис. 3.** Гистограмма скоростей солнечного ветра в 2003 г. по данным, полученным вблизи орбиты Земли КА SOHO

ность появления потоков с существенно отличающимися скоростями заметно возрастает.

Среднегодовые значения скорости  $\bar{v}_2$  за 2003 г. увеличиваются при увеличении эклиптической широты наблюдавшихся источников:  $\bar{v}_2 = 670$  км/с при  $\beta = -1^\circ$  (ЗС144),  $\bar{v}_2 = 770$  км/с при  $\beta = 33^\circ$  (ЗС254) и  $\bar{v}_2 = 845$  км/с при  $\beta = 72^\circ$  (ЗС380). Это согласуется с выводами работы [16] об увеличении скорости с гелиоширотой на больших радиальных расстояниях.

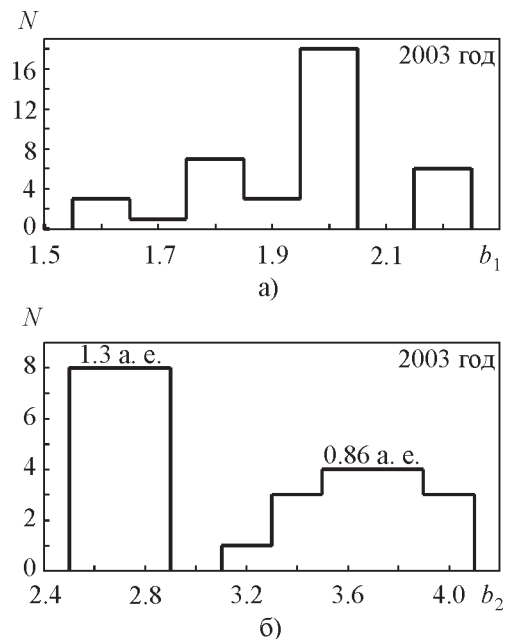
Вариации показателей степени  $n_{1,2}$  пространственного спектра межпланетной турбулентности иллюстрируются гистограммами рис. 4. Максимум распределения  $n_1$  в низкоскоростных потоках 2003 г. близок к колмогоровскому 3.7, тогда как гистограмма  $n_2$  для высокоскоростных потоков имеет два максимума. Большее значение  $n_2 = 3.7$  соответствует межпланетной среде вблизи плоскости эклиптики, меньшее  $n_2 = 3.4$  – среднеширотным и высокоширотным областям. При уменьшении солнечной активности в 2004 г. гистограмма  $n_1$  имеет два максимума, 3.4 и 3.7, распределение  $n_2$  не имеет явно выделенных значений в интервале  $n_2 = 3.1 \div 3.9$ .



**Рис. 4.** Вариации показателей степени  $n_{1,2}$  пространственного спектра межпланетной турбулентности

Какой-либо гелиоширотной зависимости показателей степени  $n_{1,2}$  в 2004 г. не обнаружено.

Еще одним параметром, характеризующим струйную структуру солнечного ветра, является ширина  $L$  (в астрономических единицах) высокоскоростного потока, определяющаяся уменьшением вдоль луча зрения электронной концентрации  $N$  в 10 раз:  $N \propto (1 \text{ а. е.} + z)^{-b_2}$ ,  $L = 10^{1/b_2} - 1$ . Низкоскоростной поток в нашем случае описывается моделью, близкой к сферически-симметричной:  $N \propto R^{-b_1}$ . Гистограммы  $b_1$  и  $b_2$  за 2003 г. представлены на рис. 5. Наиболее вероятное значение  $b_1 = 2.0$  с хорошо выраженным максимумом соответствует изотропной модели медленного потока. Распределение показателя степени  $b_2$  позволяет выделить два характерных значения  $b_2 = 2.7$  и  $b_2 = 3.7$ , что соответствует значениям параметров  $L_1 = 1.3$  а. е. и  $L_2 = 0.86$  а. е. По данным работ [19, 20] для  $R = 0.4 \div 0.8$  а. е. эффективная протяженность слоя в случае межпланетных ударных волн составляет 1 а. е., а в случае высокоскоростных потоков из корональных дыр – 0.5 а. е. Полученные в наших экспериментах два характерных значения  $L$ , по-видимому, также

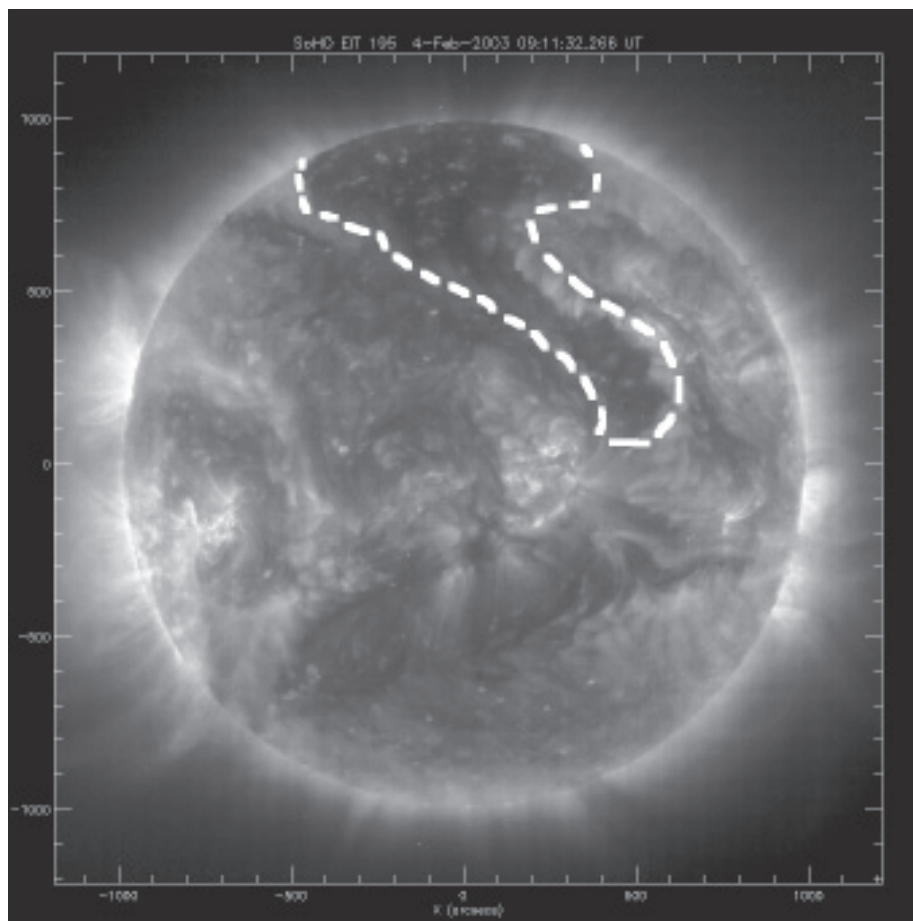


**Рис. 5.** Гистограммы  $b_1$  и  $b_2$  за 2003 г.

связаны с двумя упомянутыми крупномасштабными неоднородностями плотности. Увеличение пространственных масштабов при увеличении радиального расстояния представляется вполне естественным.

Средние за 2003 г. значения показателя степени  $\bar{b}_2 = 3.0$  для низкоширотного источника ЗС144 и  $\bar{b}_2 = 3.6$  для высокоширотного квазара ЗС380 означают гелиоширотную сплюснутость распространяющихся возмущений межпланетной плазмы, отмеченную, в частности, в работе [19]. Сравнение значений параметра  $b_2$  для источника ЗС144 в плоскости эклиптики при элонгациях  $\phi = 90^\circ$  и  $\phi = 170^\circ$  показало большие продольные размеры (1.5 а. е. при  $\phi = 170^\circ$ ) высокоскоростных потоков по сравнению с поперечными размерами (1 а. е. при  $\phi = 90^\circ$ ).

Выше были рассмотрены вариации параметров солнечного ветра в 2003-2004 гг., что позволило дать общую характеристику состояния межпланетной среды на больших удалениях от Солнца в период спада солнечной активности. Помимо оценки средних значений параметров представляют интерес динамические процессы, связанные с конкретными событиями на Солнце, которые проявляются в изменении в течение суток формы спектров мерцаний и параметров струйной структуры. Первый пример демонстрирует прохождение через просвечиваемую источником ЗС254 область высокоскоростного потока от большой корональной дыры северного полушария Солнца [21] (рис. 6). Поток достиг магнитосферы Земли и вызвал магнитную бурю 3-4 февраля 2003 г. Наблю-



**Рис. 6.** Радиоизображение Солнца в ультрафиолетовых лучах (КА SOHO). Большая корональная дыра в северном полушарии Солнца (пунктир). Рисунок взят на сайте <http://www.izmiran.rssi.ru/space/solar/archive/>

дения мерцаний источника ЗС254 проводились с 4 по 10 февраля 2003 г. на элонгации  $\phi = 145^\circ$  и эклиптической широте  $\beta = 33^\circ$ . Это позволило проследить прохождение высокоскоростного потока за орбитой Земли в интервале  $R = 1 \div 3$  а. е.

Изменения параметров солнечного ветра в указанные дни приведены на рис. 7. Рассматриваемый поток по данным КА SOHO [18] имел в окрестности Земли в течение суток заметно пониженную плотность,  $N \approx 1 \text{ см}^{-3}$ , и скорость, превышающую 750 км/с. К началу наших измерений поток миновал Землю и оказался в просвечиваемой области 4.02.2003 г., когда наблюдались минимальное значение индекса мерцаний  $m = 0.07$  (что соответствует низкой плотности среды) и максимальная скорость

$v_2 = 850 \text{ км/с}$ . В последующие дни по мере выхода потока из луча зрения скорость  $v_2$  уменьшилась до 700 км/с, а индекс мерцаний возрос до 0.15, что связано с вытеснением высокоскоростного потока более плотным низкоскоростным с  $v_1 = 400 \div 450 \text{ км/с}$ . На этом же рисунке показаны изменения во времени скорости солнечного ветра  $v_{\text{SOHO}} = 450 \div 500 \text{ км/с}$ , которые в пределах ошибок измерений совпадают с  $v_1$ . Таким образом, высокоскоростная струя из большой корональной дыры проявлялась в наблюдениях мерцаний в северных гелиоширотах в течение 6 суток, тогда как локальные измерения на КА SOHO перестали контролировать параметры потока уже к началу рассмотренного интервала времени.

Еще один пример спорадического процесса, наблюдавшегося 21-24 марта 2003 г., связан с мощной солнечной вспышкой, имевшей место 17.03.2003 г., и выбросом волокна 18.03.2003 г. [16]. Ударная волна, порожденная солнечной вспышкой, достигла орбиты Земли 20 марта и была зарегистрирована КА Genesis Discovery Mission [23] в виде скачка плотности и скорости (рис. 8), причем последняя превышала 800 км/с. Результаты определения параметров солнечного ветра по нашим наблюдениям источников ЗС380 и ЗС254 приведены на рис. 9 а, б. Указанные источники имеют сильно отличающиеся элонгации,  $\phi_{\text{ЗС380}} = 86^\circ$  и  $\phi_{\text{ЗС254}} = -138^\circ$ , и эклиптические широты  $\beta_{\text{ЗС380}} = 72^\circ$ ,  $\beta_{\text{ЗС254}} = 33^\circ$ , что позво-

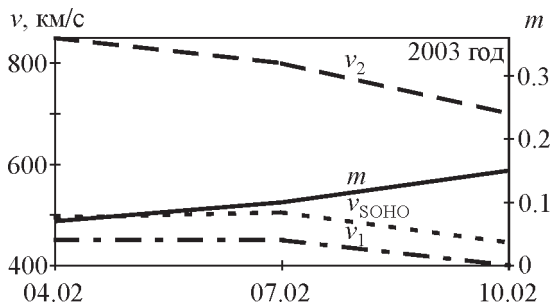


Рис. 7. Изменения параметров солнечного ветра в период с 04.02.2003 г. по 10.02.2003 г.

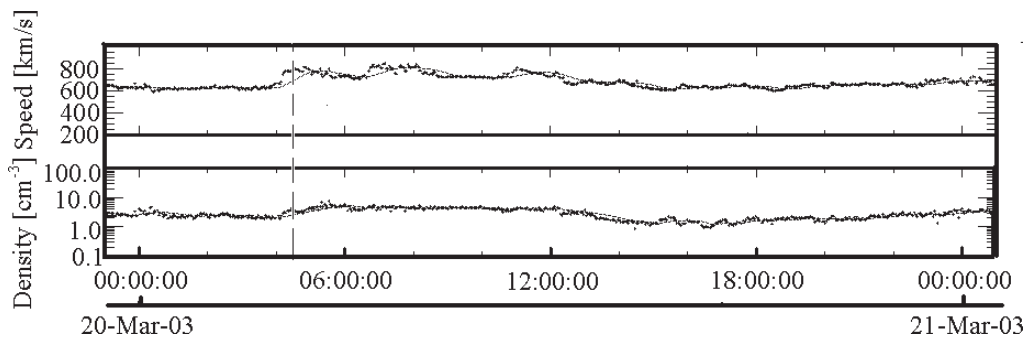
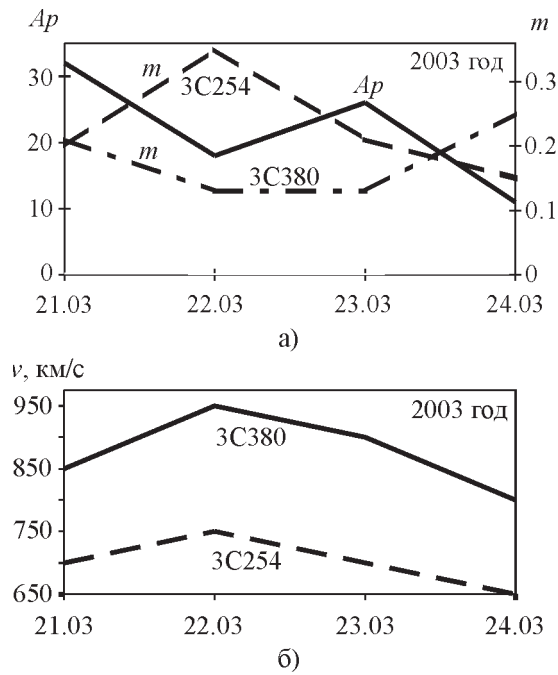


Рис. 8. Ударная волна, порожденная солнечной вспышкой и зарегистрированная КА Genesis Discovery Mission в виде скачков скорости и плотности. Рисунок взят на сайте Genesis Discovery Mission (<http://genesis.lanl.gov/plots/test/mec/1day>)





**Рис. 9.** Изменения индекса мерцаний  $m$ , скорости солнечного ветра  $v$  и индекса геомагнитной активности  $A_p$  в период с 21 по 24 марта 2003 г.

ляет исследовать пространственную структуру распространяющегося возмущения. Связанная с ударной волной магнитная буря, наблюдавшаяся 20-21 марта, вызвала увеличение  $A_p$ -индекса геомагнитной активности [22] ( $A_p = 32$ , рис. 9, а). Высокие значения индекса мерцаний,  $m = 0.21$  для источника 3C380 и  $m = 0.35$  для источника 3C254, наблюдались 21 и 22 марта соответственно (рис. 9, а) вследствие разной удаленности от Солнца просвечиваемых областей межпланетной среды. Максимальные значения скорости  $v_2$  ударной волны (рис. 9, б) имели место 22 марта:  $v_2 = 950$  км/с для высокоширотного источника 3C380 и  $v_2 = 750$  км/с для среднеширотного 3C254. Выброс волокна обусловил магнитную бурю 23 марта ( $A_p = 27$ ) [22] и увеличение 24 марта индекса мерцаний высокоширотного источника 3C380 до  $m = 0.25$  при уменьшающейся скорости потока. В более удаленной от Солнца области, зондируемой источником 3C254, последнее возмущение до 24 марта никак не проявилось.

## Заключение

Рассмотренные выше вариации параметров среды демонстрируют возможности метода межпланетных мерцаний в декаметровом диапазоне длин волн при исследовании струйной структуры солнечного ветра на больших радиальных расстояниях, не охваченных регулярными ракетными измерениями. Используемая в настоящей работе упрощенная двухскоростная модель позволяет получать приемлемые оценки основных параметров межпланетной плазмы, в большинстве случаев хорошо согласующиеся с прямыми измерениями на КА. В результате проведенных в 2003-2004 гг. исследований на радиотелескопе УТР-2 определены наиболее вероятные значения параметров медленного и быстрого потоков солнечного ветра, установлена гелиоширотная зависимость скорости солнечного ветра и показателя степени турбулентности в год повышенной солнечной активности, выявлены два характерных пространственных масштаба высокоскоростных потоков. Экспериментально доказано, что при больших элонгациях вклад в наблюдаемые мерцания вносит протяженная (до 3 а. е.) область межпланетной среды на луче зрения, поэтому более предпочтительной является теория многократного рассеяния, использованная при расчетах энергетических спектров мерцаний.

Результаты настоящей работы получены при проведении сравнительно коротких наблюдательных циклов длительностью от 4 до 6 суток. Это затрудняло детальное изучение последовательности высокоскоростных потоков. Перспективы дальнейших исследований межпланетной среды в декаметровом диапазоне заключаются в увеличении интервала непрерывных наблюдений до 1 месяца при одновременном использовании радиотелескопов УТР-2 и УРАН-2 [24], разнесенных на 150 км. Это позволит реализовать метод дисперсионного анализа [3] и оценить функцию распределения скоростей на луче зрения, сделав шаг вперед по сравнению с двухскоростной моделью солнечного ветра.

Работа выполнялась при частичной финансовой поддержке гранта INTAS 03-5727.

### Литература

1. Иванов К. Г. Солнечные источники потоков межпланетной плазмы на орбите Земли // Геомагнетизм и аэронавигация. – 1996. – Т. 36, №2. – С. 19-27.
2. Коваленко В. А. Солнечный ветер. – М.: Наука, 1983. – 273 с.
3. Лотова Н. А. Радиоастрономические исследования струйной структуры солнечного ветра // Итоги науки и техники. Сер. “Астрономия”. – 1988. – Т. 33. – С. 121-149.
4. Ефимов А. И., Чашей И. В., Шишов В. И., Яковлев О. И. Ускорение солнечного ветра по данным радиопросвечивания // Космические исследования. – 1990. – Т. 28, вып. 4. – С. 581-585.
5. Бовкун В. П., Жук И. Н. Мерцания космических источников в декаметровом диапазоне радиоволн на неоднородностях межпланетной плазмы и ионосферы // Космическая наука и техника. – 1992. – Вып. 7. – С. 80-91.
6. Радиотелескоп декаметрового диапазона волн УТР-2 / С. Я. Брауде, А. В. Мень, Л. Г. Содин / В сб.: «Антенны». Под ред. А. А. Пистолькорса. – М.: Связь, 1978, вып. 26. – С. 3-15.
7. Фалькович И. С., Калиниченко Н. Н., Гридин А. А., Бубнов И. Н. О возможности широкополосных наблюдений межпланетных мерцаний на декаметровых волнах // Радиофизика и радиоастрономия. – 2004. – Т. 9, №2. – С. 121-129.
8. Брауде С. Я., Галанин В. В., Инютин Г. А., Мень А. В., Мори Х., Рашковский С. Л., Синицын В. Г., Шарыкин Н. К. Турбулентная структура солнечного ветра по наблюдениям в декаметровом диапазоне радиоволн // Астрономический журнал. – 1995. – Т. 72, №5. – С. 761- 766.
9. Kukushkin A., Olyak M. Propagation effects in the radio interferometry of polarized radiation // Waves in Random Media. – 1994. – Vol. 4, No. 1. – P. 59-81.
10. Оляк. М. Р. Об использовании методов статистической радиофизики для анализа межпланетных мерцаний в декаметровом диапазоне радиоволн // Вестник Харьк. нац. универс. – 2002. – № 570, вып. 2. – С. 210-211.
11. Алексеев Г. А., Гельфрейх Г. Б., Зайцев В. В., Илясов Ю. П., Кайдановский Н. Л., Матвеевко Л. И., Мень А. В., Молчанов А. П., Степанов А. П., Шишов В. И. Советские радиотелескопы и радиоастрономия Солнца. – М.: Наука, 1990. – 212 с.
12. Татарский В. И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. – М.: Наука, 1967. – 548 с.
13. Оляк М. Р. О методах интерпретации межпланетных мерцаний декаметровых радиоисточников // Кинематика и физика небесных тел. – 2004. – Т. 20, №5. – С. 416-421.
14. Hayashi K., Kojima M., Tokumaru M., Fujiri K. MHD tomography using interplanetary scintillation measurement // Geophys. Res. – 2003. – Vol. 108, No. A3. – P. 1102-1123.
15. Фалькович И. С., Коноваленко А. А., Калиниченко Н. Н., Бубнов И. Н. Частотная декорреляция ионосферных мерцаний радиоисточника Кассиопа А в диапазоне 20÷30 МГц // Радиофизика и радиоастрономия. – 2005. – Т. 10, №2. – С. 113-119.
16. Ефимов А. И., Лотова Н. А. Статистический анализ пространственно-временной структуры солнечного ветра // Геомагнетизм и аэронавигация. – 1978. – Т.18, №6. – С. 998-1001.
17. Виткевич В. В., Власов В. И. Характеристики межпланетных электронных неоднородностей по наблюдениям 1967-1969 гг. // Астрономический журнал. – 1972. – Т. 49, вып. 3. – С. 595-606.
18. <http://umtof.umd.edu/pm>
19. Власов В. И. Межпланетные ударные волны по наблюдениям мерцаний радиоисточников // Геомагнетизм и аэронавигация. – 1981. – Т. 21, №5. – С. 927-929.
20. Власов В. И. Радиоастрономические наблюдения межпланетной ударной волны от солнечной вспышки 18 августа 1979 г. // Геомагнетизм и аэронавигация. – 1986. – Т. 26, №2. – С. 182-186.
21. <http://www.izmiran.rssi.ru/space/solar/archive/>
22. [http://www.lmsal.com/solarsoft/last\\_events/](http://www.lmsal.com/solarsoft/last_events/)
23. <http://genesis.lanl.gov/plots/test/mec/1day/>
24. Мень А. В., Шарыкин Н. К., Захаренко В. В. и др. Радиотелескоп декаметрового диапазона волн УРАН-2 // Радиофизика и радиоастрономия. – 2003. – Т. 8, №4. – С. 345-356.

**Варіації параметрів струменевої  
структури сонячного вітру на відстанях  
понад 1 а. о. у 2003-2004 рр.**

**І. С. Фалькович, О. О. Коноваленко,  
М. М. Калиниченко, М. Р. Оляк,  
А. О. Гридін, І. М. Бубнов, А. Лекашо,  
Х. О. Рукер**

Наведено результати дворічних досліджень міжпланетних мерехтінь космічних радіоджерел у декаметровому діапазоні хвиль на елонгаціях  $90 \div 170^\circ$ . З використанням двошвидкісної моделі середовища знайдено найбільш вірогідні значення показників ступеня просторового спектру турбулентності, ширини потоків та їх швидкостей. Показано можливість вивчення спорадичних процесів у міжпланетному середовищі на прикладах спостережень ударних хвиль від сонячних спалахів і високошвидкісних потоків з корональних дір.

**Variations of Parameters of Solar Wind  
Stream Structure outside 1 AU  
in 2003-2004**

**I. S. Falkovich, A. A. Konvalenko,  
N. N. Kalinichenko, M. R. Olyak,  
A. A. Gridin, I. N. Boobnov,  
A. Lecacheux, and H. O. Rucker**

Results of the two-year IPS (interplanetary scintillation) decameter wavelength observations of space sources at the elongations of  $90 \div 170^\circ$  are presented. The most probable values for the spectral indices of the spatial turbulence spectra, stream widths and their velocities are obtained by using a two-speed medium model. Possibility to study the interplanetary medium sporadic processes is shown by the examples of the observed shock waves from solar bursts and high speed streams from the coronal holes.