

УДК 523.164.42

І. С. Фалькович¹, Н. Н. Калиниченко¹, А. А. Коноваленко¹,
Л. Н. Литвиненко¹, В. Н. Мельник¹, М. Р. Ольяк¹,
В. В. Доровский¹, А. А. Гридин¹, И. Н. Бубнов¹, А. И. Браженко²

¹Радіоастрономічний інститут НАН України, Харків

²Гравиметрична обсерваторія Інституту геофізики НАН України, Полтава

Космическая погода по наблюдениям межпланетных мерцаний и спорадического радиоизлучения Солнца на декаметровых волнах

Надійшла до редакції 08.01.08

Наведено результати спостережень міжпланетного мерехтіння і радіовипромінювання Сонця на радіотелескопах УТР-2 і УРАН-2. Показано високу ефективність спостережень на декаметрових радіохвильях для вивчення сонячного вітру і з'ясування геоекспективності різних типів викидів корональних мас.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что ежесекундно Солнце теряет около миллиона тонн вещества. Этот поток ионизированной плазмы, называемый солнечным ветром, истекает из солнечной короны со скоростью 300—1000 км/с в окружающее космическое пространство. Периодически на Солнце происходят выбросы колossalных объемов плазмы, так называемые выбросы корональных масс или SME's (Coronal Mass Ejections), сопровождающиеся, среди прочего, всплесками радиоизлучения и приводящие к резкому увеличению скорости и плотности солнечного ветра. Усиление солнечного ветра, вызванное приходом к Земле ударной волны от SME, приводит к сжатию магнитосферы Земли, частичному проникновению частиц солнечного ветра вглубь магнитосферы. Эти процессы сопровождаются колебаниями напряженности и направления геомагнитного поля или магнитными бурями и другими геофизическими явлениями. Магнитные бури, как извест-

но, могут приводить к проблемам с функционированием радиотехнических устройств, а также ухудшению самочувствия людей с ослабленным здоровьем.

В наши дни выбросы корональных масс эффективно исследуются с помощью космических аппаратов (КА), таких как SOHO, ACE и других. Они позволяют с высокой вероятностью обнаружить выброс и проследить его динамику до расстояний в несколько радиусов Солнца, а в случае прохождения ударной волны, рожденной выбросом, передать предупреждение по радиоканалу на Землю. Наземные радиотелескопы, которые по некоторым своим параметрам, в частности по чувствительности зачастую превосходят приемную аппаратуру космических аппаратов, позволяют эффективно дополнять работу систем предупреждения космического базирования. Например, наблюдения мерцаний радиоизлучения большого количества космических источников позволяют обнаружить крупномасштабные возмущения солнечного ветра, вызван-

ные выбросами корональных масс, и проследить за их движением от поверхности Солнца до орбиты Земли и далее во внешнюю гелиосферу [21]. Высокая чувствительность наземных радиотелескопов позволяет также получать основные характеристики всплесков солнечного радиоизлучения, которые сопровождают выбросы корональных масс. Последнее представляет большой интерес для прогнозирования магнитных бурь, вызванных СМЕ's (геоэффективность СМЕ) [15]. Для решения задач, связанных с прогнозированием космической погоды, Украина обладает уникальной сетью декаметровых радиотелескопов УРАН [10].

АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

В экспериментах использовались два радиотелескопа системы УРАН — УТР-2 [3] (эффективная площадь на частоте 25 МГц около 150000 м^2 для направления в зенит, диапазон рабочих частот 8—32 МГц) и УРАН-2 [10] (28000 м^2 и 8—32 МГц соответственно). Для повышения чувствительности радиотелескопы были оснащены специально разработанными широкополосными радиоприемными и регистрирующими устройствами. В случае радиотелескопа УТР-2 применялся 3-канальный широкополосный радиометр с результирующей полосой частот 3 МГц [14], 60-канальный фильтровой спектрометр [19] и цифровой спектрополяриметр DSP [22], а в случае УРАН-2 — 16-канальный корреляционный радиометр с общей полосой пропускания 10 МГц [13]. Радиоисточники наблюдались ночью сеансами длительностью от одной до нескольких недель.

Определение параметров солнечного ветра проводилось путем сопоставления полученных из эксперимента энергетических спектров и дисперсионных зависимостей фазовой скорости межпланетных мерцаний теоретическому расчету. При углах элонгации $\varepsilon \geq 70^\circ$ в декаметровом диапазоне радиоволн рассеивающий 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, [2]) и, в частности, метода плавных возмущений и близкого к нему метода фейнмановских

интегралов по траекториям в режиме слабого рассеяния [11, 18].

Метод фейнмановских интегралов по траекториям при наблюдениях в одном пункте позволяет получить энергетический спектр слабых межпланетных мерцаний в виде [11]:

$$W(f) \approx 2\pi^2 \frac{L\omega_p^4}{(2\pi fc)^2} \times \\ \times \int_0^1 d\xi \int_{-\infty}^{\infty} \kappa_\perp dk_\perp [1 - \cos(\kappa_\perp^2 L\xi^2/k)] \times \\ \times \exp\left[-\frac{1}{2}(\kappa_\perp L\xi\theta)^2\right] \frac{\Phi_N(\kappa_\perp, 0)}{[\kappa_\perp^2 V_\perp^2 - 4\pi^2 f^2]^{1/2}}. \quad (1)$$

Пространственный спектр неоднородностей электронной концентрации $\Phi_N(\kappa_\perp, 0)$ предполагается степенным и изотропным [1]:

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

Выше ω_p — плазменная частота, $a = 2\pi f/V_\perp$, $\zeta = z/L$, L — толщина слоя, $V_\perp \equiv V_\perp(\zeta) = V \sin \varepsilon / (R(\zeta)/R_0)$, $R_0 = 1 \text{ AE}$, θ — угловой размер источника, $\kappa_\perp = |\boldsymbol{\kappa}_\perp|$, $\boldsymbol{\kappa}_\perp = \{\kappa_x, \kappa_y\}$ — пространственный волновой вектор, $\sigma_N^2(\zeta)$ — дисперсия относительных флуктуаций электронной концентрации $\delta N^2/\langle N \rangle^2$, L_0 , l_0 — внешний и внутренний масштабы межпланетной турбулентности, n — показатель степени пространственного спектра неоднородностей электронной концентрации.

Кросс-спектр мерцаний при наблюдениях в двух разнесенных в пространстве точках описывается выражением [12]

$$W(r, f) \approx \\ \approx \pi^2 \frac{L\omega_p^4}{c^2 (2\pi f)^2} \int_0^1 \frac{d\xi}{\xi^{1/2}} \int_{-\infty}^{\infty} \kappa_\perp dk_\perp [1 - \cos(\kappa_\perp^2 L\xi^2/k)] \times \\ \times \frac{\Phi_N(\kappa_\perp, 0)}{[\kappa_\perp^2 V_\perp^2(\zeta) - 4\pi^2 f^2]^{1/2}} \times \\ \times \exp\left[-\frac{1}{2}(\kappa_\perp L\xi\theta)^2 + i \frac{2\pi fr}{V_\perp(\zeta)}\right]. \quad (2)$$

Здесь r — расстояние между приемными антennами (база интерферометра).

Измерив кросс-спектр (2), можно получить дисперсионную зависимость фазовой скорости мерцаний:

$$V(f) = \frac{2\pi fr}{\Delta\varphi(f)}, \quad (3)$$

где

$$\Delta\varphi(f) = \arctg \frac{\text{Im} W(r, f)}{\text{Re} W(r, f)}.$$

Для сравнения с экспериментом наряду с простой моделью сферически симметричного солнечного ветра со средней скоростью V , показателем трехмерного спектра флюктуаций плотности электронов n , убывающих с расстоянием от Солнца как $\sigma_N(\zeta) \propto R^{-b}$, $b \approx 2$, $R \equiv R(\zeta)$ — расстояние точки на луче зрения от Солнца, была также использована более сложная много-потоковая модель [9]. В этом случае предполагалось, что на фоне близкого к сферически-симметричному солнечному ветру распространяются несколько высокоскоростных потоков. Например, в случае двух высокоскоростных потоков луч зрения пересекают три потока: медленный с параметрами V_1 , n_1 , b_1 и два быстрых с параметрами V_2 , n_2 , $\sigma_N(\zeta) \propto [R_0 + L\zeta]^{-b_2}$ и V_3 , n_3 , $\sigma_N(\zeta) \propto [R_0 + L\zeta]^{-b_3}$. Энергетический спектр слабых мерцаний в этом случае можно представить в виде суммы

$$W_\Sigma(f) = C_1 W(f, V_1, n_1, b_1) + C_2 W(f, V_2, n_2, b_2) + \\ + C_3 W(f, V_3, n_3, b_3),$$

где $W(f, V_1, n_1, b_1)$, $W(f, V_2, n_2, b_2)$ и $W(f, V_3, n_3, b_3)$ определяются из выражения (1). Предполагалось также, что мощности потоков приблизительно равны ($C_1 \approx C_2 \approx C_3$), что не противоречит известным из наблюдений параметрам медленного и быстрого солнечного ветра [17] и позволяет упростить задачу. Присутствие на луче зрения существенно отличающихся по мощности потоков приведет к незначительному искажению параметров потока с большей мощностью. В этом случае также можно применять односкоростную модель, близкую к сферически-симметричной.

На рис. 1, 2 приведены два примера восстановления параметров солнечного ветра на луче зрения, полученные с интервалом в 10 дней в октябре 2006 г. В первом примере наблюдался источник 3С144, расположенный в плоскости эклиптики. Во втором — источник 3С196, имеющий гелиошироту около 30° . Для первого случая среда на луче зрения в плоскости эклиптики хорошо описывается моделью медленного сферически симметричного солнечного ветра. Для бо-

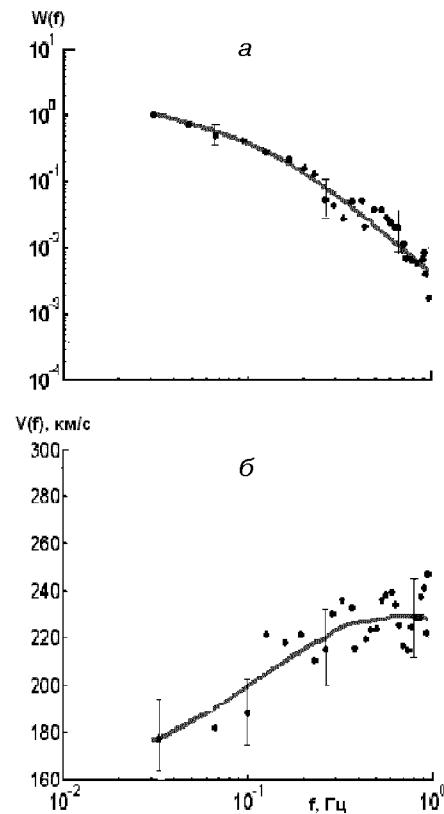


Рис. 1. Спектры мерцаний (а) и дисперсионные зависимости (б) для радиоисточника 3С144, октябрь 2006 г. (точками обозначены экспериментальные кривые, сплошными линиями — результат расчета). Восстановленные с их помощью параметры солнечного ветра: $n = 3.0$, $V = 230$ км/с (модель сферически симметричного солнечного ветра)

лее высокоширотного источника используется трехслойная модель с высокими скоростями. Это хорошо согласуется с общепринятыми представлениями о соотношении скоростей в области солнечного экватора и на высоких гелиоширотах в годы минимума солнечной активности. Рис. 3 схематически иллюстрирует картину солнечного ветра на луче зрения на источник 3С196.

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВАРИАЦИЙ ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА ПО НАБЛЮДЕНИЯМ МЕЖПЛАНЕТНЫХ МЕРЦАНИЙ

Результаты статистического анализа вариаций параметров солнечного ветра в 2003—2004 гг.

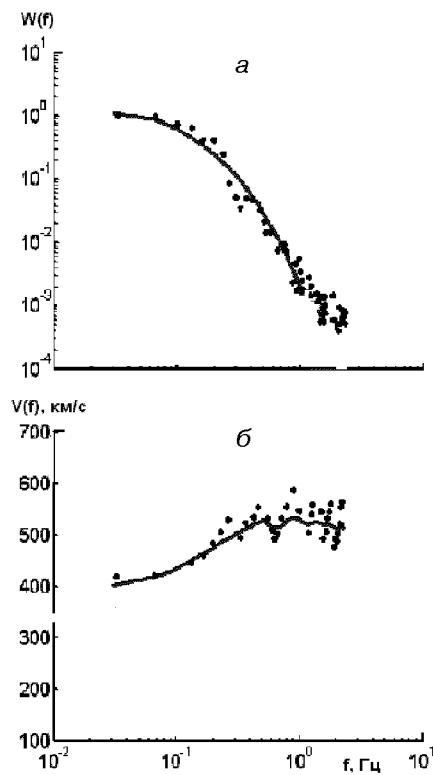


Рис. 2. Спектры мерцаний (а) и дисперсионные зависимости (б) для радиоисточника 3С196, октябрь 2006 г. (точки — экспериментальные кривые, сплошные линии — расчет). Восстановленные с их помощью параметры солнечного ветра: первый поток — $n_1 = 3.8$, $V_1 = 550$ км/с, $l_0 = 300$ км, $L_0 = 1$ АЕ; второй — $n_2 = 3.7$, $V_2 = 730$ км/с, $l_0 = 100$ км, $L_0 = 2$ АЕ; третий — $n_3 = 3.9$, $V_3 = 500$ км/с

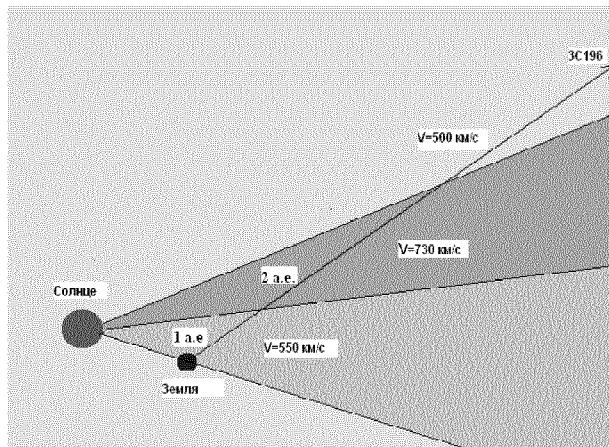


Рис. 3. Солнечный ветер на луче зрения на источник 3С196

илюстрируют приведенные ниже гистограммы, построенные с использованием радиоисточников 3С144, 3С196, 3С254, 3С273, 3С280 и 3С380. На рис. 4 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 $W = 65$ в 2003 г. и $W = 35$ 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 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 $V_1 = 350—400$ км/с был достаточно велик. Тем самым и в случае больших расстояний от Солнца подтверждается вывод работ [4, 7] об уменьшении средних скоростей и числа высокоскоростных потоков в годы пониженной солнечной активности. Сколько-нибудь заметного снижения максимальных значений скорости $V_{2\max} = 700—900$ км/с также не наблюдалось.

На рис. 5 приведена гистограмма скоростей солнечного ветра в совпадающие с нашими экс-

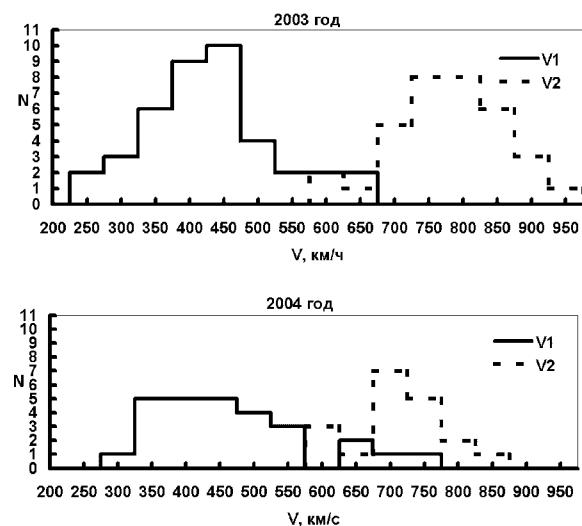


Рис. 4. Гистограмма скоростей солнечного ветра в период с 2003 по 2004 гг.

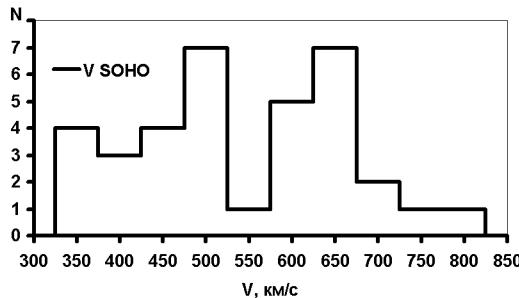


Рис. 5. Гистограмма скоростей солнечного ветра в совпадающие дни 2003 г., построенная по данным, полученным вблизи орбиты Земли КА SOHO

периментами дни 2003 г., построенная по данным, полученным вблизи орбиты Земли КА SOHO [<http://umt.of.umd.edu/pm>]. Распределение скоростей также имеет два максимума $V_1 = 500$ км/с и $V_2 = 650$ км/с, однако по сравнению с данными радиопросвечивания (рис. 4) 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 декаметровых волнах вклад в анализируемые энергетические спектры вносит, как показали расчеты, среда на луче зрения протяженностью в несколько АЕ. При таких больших пространственных масштабах и с учетом наблюдений высокоширотных источников вероятность появления потоков с существенно отличающимися скоростями заметно возрастает.

Среднегодовые значения скорости \bar{V}_2 за 2003 г. увеличиваются при увеличении экваториальной 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 [7] об увеличении скорости с гелиоширотой на больших радиальных расстояниях.

Вариации показателей степени $n_{1,2}$ пространственного спектра межпланетной турбулентно-

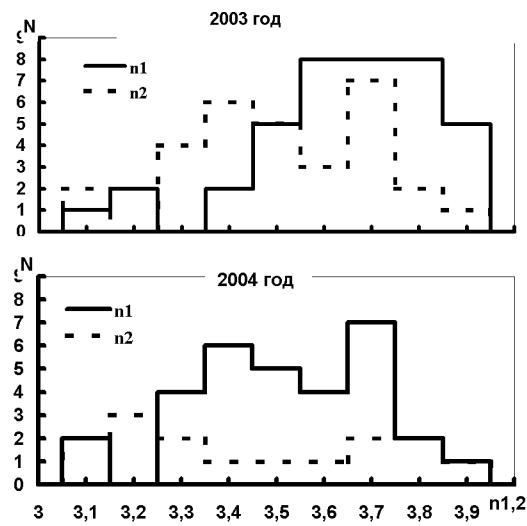


Рис. 6. Вариации показателей степени $n_{1,2}$ пространственно-спектра межпланетной турбулентности

сти иллюстрируются гистограммами на рис. 6. 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, а распределение n_2 не имеет явно выделенных значений в интервале $n_2 = 3.1...3.9$. 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 высокоскоростного потока, определяющаяся уменьшением вдоль луча зрения электронной концентрации N в десять раз: $N \propto (1 \text{ AE} + z)^{-b_2}$, $L[\text{AE}] = 10^{1/b_2} - 1$. 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. 7. Наиболее вероятное значение $b_1 = 2.0$ с хорошо выраженным максимумом соответствует изотропной модели медленного потока. Распределение показателя степени b_2 позволяет выде-

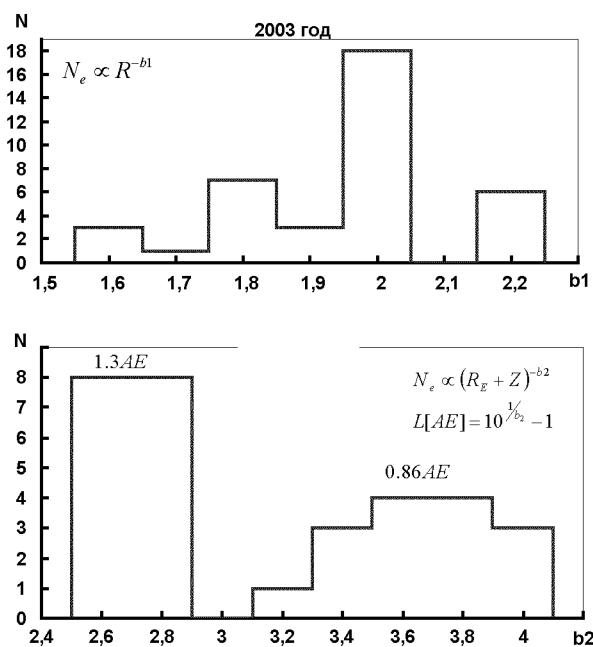


Рис. 7. Гистограммы b_1 и b_2 за 2003 г.

лить два характерных значения $b_2 = 2.7$ и $b_2 = 3.7$, что соответствует значениям параметра $L_1 = 1.3$ АЕ и $L_2 = 0.8$ АЕ. По данным работ [5, 6] для $R = 0.4\ldots 0.8$ АЕ эффективная протяженность слоя в случае межпланетных ударных волн составляет 1 АЕ, а в случае высокоскоростных потоков из корональных дыр — 0.5 АЕ. Полученные в наших экспериментах два характерных значения L также, по-видимому, 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 [5]. Сравнение значений параметра b_2 в плоскости эклиптики для элонгаций $\varepsilon = 90^\circ$ и $\varepsilon = 170^\circ$ источника ЗС144 показало большие продольные размеры 1.5 АЕ ($\varepsilon = 170^\circ$) высокоско-

ростных потоков по сравнению с поперечными размерами 1 АЕ ($\varepsilon = 90^\circ$).

ВЫСОКОСКОРОСТНЫЕ ПОТОКИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА ПО НАБЛЮДЕНИЯМ МЕРЦАНИЙ, СВЯЗАННЫЕ СО СМЕ'S И КОРОНАЛЬНЫМИ ДЫРАМИ

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 уменьшения солнечной активности. Помимо оценки средних значений параметров, представляют интерес динамические процессы, связанные с яркими событиями на Солнце, которые проявляются в изменении в течение суток формы спектров мерцаний и параметров струйной структуры. Первый пример демонстрирует прохождение через просвечивающую источником ЗС254 область высокоскоростного потока от большой корональной дыры северного полушария Солнца [sohowww.nascom.nasa.gov/] (рис. 8). Поток достиг магнитосферы Земли и вызвал магнитную бурю 3-4 февраля 2003 г. Наблюдения мерцаний источника ЗС254 проводились с 4 по 10 февраля 2003 г. на большой элонгации $\varepsilon = 145^\circ$ и эклиптической широте $\beta = 33^\circ$. Это позволило проследить прохождение высокоскоростного потока за орбитой Земли в интервале $R = 1\ldots 3$ АЕ.

Изменения параметров солнечного ветра в указанные дни приведены на рис. 9. Рассматриваемый поток по данным КА SOHO [<http://umt.of.umd.edu/pm>] 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 февраля 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 $V_1 = 400\ldots 450 \text{ км/с}$. На этом же рисунке показаны изменения во времени скорости солнечного ветра $V_{SONO} = 450\ldots$

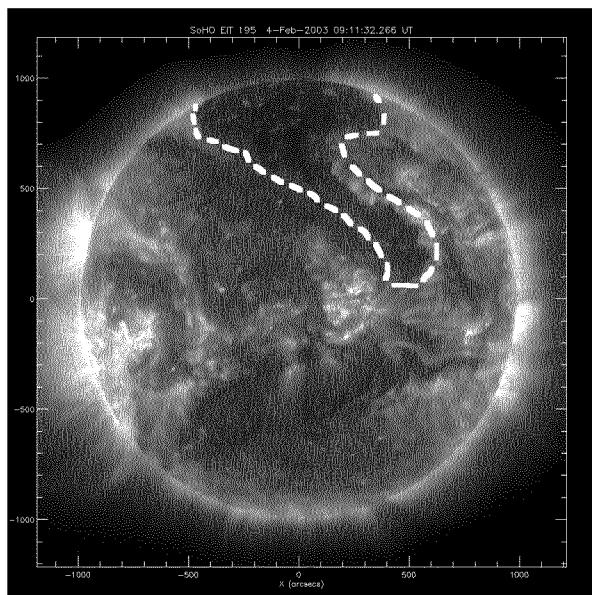


Рис. 8. Радиоизображение Солнца в ультрафиолетовых лучах (КА SOHO). Большая корональная дыра в северном полушарии Солнца (пунктир)

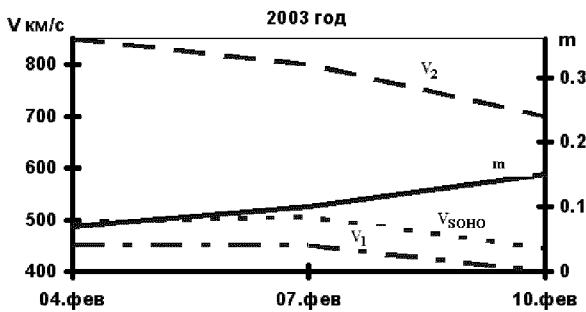


Рис. 9. Изменения параметров солнечного ветра в период с 4 по 10 февраля 2003 г.

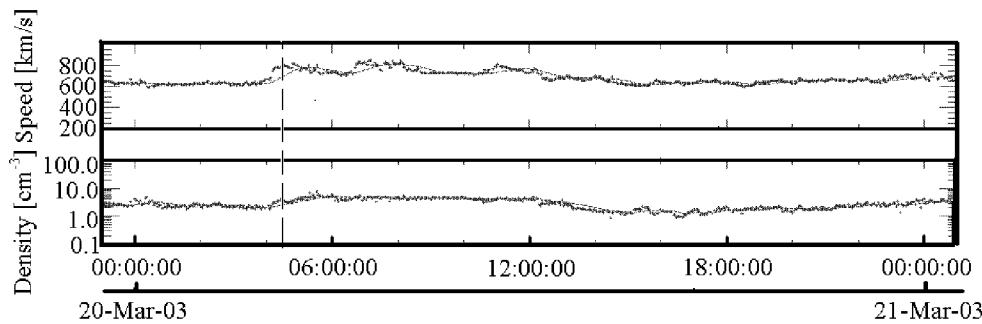


Рис. 10. Ударная волна, порожденная солнечной вспышкой, зарегистрированная КА Genesis

500 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—24.03.2003 г., связан с мощной солнечной вспышкой 17.03.2003 г. и выбросом волокна 18.03.2003 г. Ударная волна, порожденная солнечной вспышкой, достигла орбиты Земли 20.03.2003 г. и была зарегистрирована КА Genesis Discovery Mission [<http://genesis.lanl.gov/plots/test/mec/1day/>] в виде скачка плотности и скорости (рис. 10), причем последняя превышала 800 км/с. Результаты определения параметров солнечного ветра по нашим наблюдениям источникам ЗС380 и ЗС254 приведены на рис. 11, а, б. Указанные источники имеют сильно отличающиеся элонгации $\varepsilon_{ЗС380} = 86^\circ$, и эклиптические широты $\beta_{ЗС380} = 72^\circ$, $\beta_{ЗС254} = 33^\circ$, что позволяет оценить пространственную структуру распространяющегося возмущения. Связанная с ударной волной магнитная буря 20—21.03.2003 г. вызвала увеличение A_p -индекса геомагнитной активности [http://www.lmsal.com/solarsoft/last_events/] ($A_p = 32$, рис. 11, а, сплошная линия). Высокие значения индекса мерцаний $m_{ЗС380} = 0.21$ и $m_{ЗС254} = 0.35$ наблюдались 23 и 22 марта соответственно (рис. 11, а, пунктирные линии), вследствие разной удаленности от Солнца просвечиваемых областей межпланетной среды. Максимальные значения скорости V_2 ударной волны (рис. 11, б)

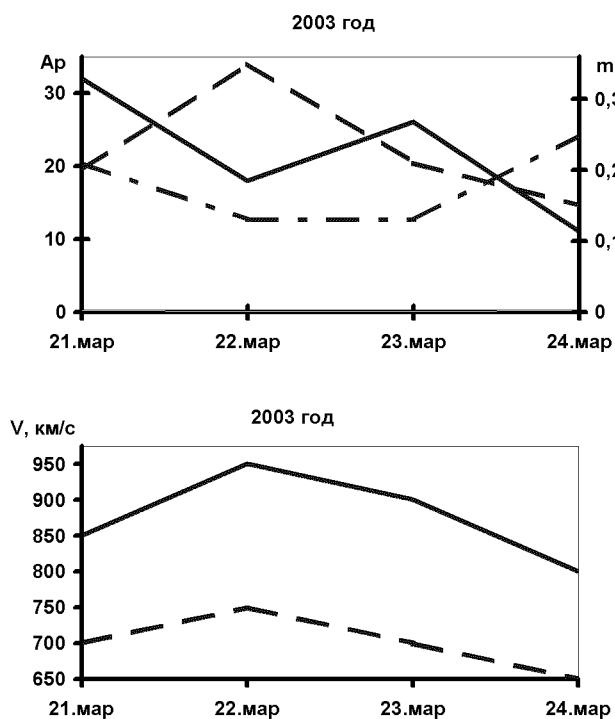


Рис. 11. Изменения индекса мерцаний m , скорости солнечного ветра v и индекса геомагнитной активности A_p в период с 21 по 24 марта 2003 г.

имели место 22 марта: $V_2 = 950$ км/с для высокоширотного источника ЗС380 и $V_2 = 750$ км/с для среднеширотного ЗС254. Выброс волокна обусловил магнитную бурю 23.03.2003 ($A_p = 27$) [http://www.lmsal.com/solarsoft/last_events/] и увеличение 24.03.2003 г. индекса мерцаний $m = 0.25$ высокоширотного источника ЗС380 при уменьшающейся скорости потока. В более удаленной от Солнца области, зондируемой источником ЗС254, последнее возмущение до 24 марта никак не проявилось.

ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕОЭФФЕКТИВНОСТИ СМЕ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЛЕСКОВ II И IV ТИПОВ

Способность СМЕ вызывать геомагнитные бури (геоэффективность СМЕ) оценивается индексом D_{st} (Disturbance storm time). Бури с $D_{st} < -100$ нТл считаются сильными, от -100 до

-50 нТл — умеренными, и бури с $D_{st} > -50$ нТл — слабыми.

Возникновение СМЕ в нижней короне может быть зарегистрировано в оптике (в видимом свете или в ультрафиолетовых лучах) с помощью коронографов, например SOHO-LASCO, при этом могут быть определены скорость и размеры СМЕ. Однако вследствие того, что действующие коронографы позволяют получать только проекцию скорости СМЕ на картишную плоскость, реальная скорость СМЕ может превышать измеренную в несколько раз. Это, в конечном счете, может привести к существенной ошибке в прогнозе времени прихода СМЕ в окрестности Земли. Более того, СМЕ's, распространяющиеся из центральных областей Солнца в направлении Земли, вообще могут быть не обнаружены оптическими инструментами. Однако по данным работы [15] именно такие события представляют особый интерес с точки зрения предсказания космической погоды. Показано, что около 71 % всех зарегистрированных в 1995—2005 гг. центральных гало-СМЕ (источник расположен в пределах 45° от центрального меридiana) вызывали сильные магнитные бури ($D_{st} < -100$ нТл), т. е. являлись геоэффективными. Лимбовые события, чаще всего наблюдаемые оптическими коронографами (источник находится в пределах $45\text{--}90^\circ$ от центра), обладают меньшей геоэффективностью и вызывают лишь слабые магнитные бури ($-100 < D_{st} < -30$ нТл). А СМЕ's, возникающие на обратной стороне Солнца, вообще не являются геоэффективными. В такой ситуации для надежного обнаружения наиболее геоэффективных солнечных явлений необходимо дополнение оптических наблюдений наблюдениями в радиодиапазоне в широкой полосе частот.

Наиболее ярким проявлением СМЕ в радиодиапазоне являются всплески II и IV типов. В последнее время они интенсивно исследовались с помощью межпланетных станций (в частности, WIND) в диапазоне частот от 2 кГц до 10 МГц [23]. С точки зрения прогнозирования геомагнитных возмущений, наблюдения этих всплесков в декаметровом и километровом диапазонах длин волн представляются наиболее информативными, так как всплески II типа в этих диапазонах порождаются наиболее быстрыми (скорость более 1000 км/с) и массивными (масса около 10^{16} г) СМЕ's [16].

Поскольку механизм излучения всплесков II типа — плазменный, скорость частотного дрейфа определяется проекцией скорости СМЕ на направление градиента плотности корональной плазмы. В частном случае, когда направление распространения участка СМЕ, от которого наблюдается радиоизлучение, совпадает с направлением градиента (например, при центральном СМЕ), измеренная скорость СМЕ соответствует его реальной пространственной скорости.

Одновременные наблюдения солнечного излучения из трех удаленных друг от друга точек (двух на орбите Земли, космическая миссия STEREO [<http://stereo.gsfc.nasa.gov/>], и одной наземной, радиотелескоп УТР-2) позволит получить полную информацию о размерах, скорости и направлении распространения источников солнечных всплесков II типа и связанных с ними ударных волн.

Наблюдения спорадического солнечного излучения на радиотелескопе УТР-2 проводились с использованием 60-канального фильтрового спектрометра и цифрового спектрополяриметра DSP. С помощью новой аппаратуры регистрации в период с 2005 по 2007 гг. в диапазоне частот 8—32 МГц были впервые обнаружены всплески II и IV типов, а также выявлены новые, неизвестные ранее свойства этих всплесков [<http://umtof.umd.edu/pm>]. Всего было зарегистрировано более 10 всплесков II типа, причем большинство из них приходились на период спада 23-го солнечного цикла. Во всех случаях был проведен анализ связи наблюдавшихся всплесков II типа, соответствующих СМЕ's, и геомагнитных возмущений. Из результатов наблюдений в оптике [15] известно, что геомагнитные возмущения следует ожидать во временном интервале от 1 до 5 сут после начала СМЕ.

По результатам анализа оказалось, что только трем из 14 зарегистрированных всплесков II и IV типов соответствовали сильные или умеренные геомагнитные бури в указанном выше временном интервале. На рис. 12 показаны динамические спектры двух последовательных всплесков II типа (в 8:56 и в 9:03 UT). Оба всплеска имели скорость частотного дрейфа около 33 кГц/с, что в рамках модели солнечной короны Ньюкирка соответствует скорости источника примерно 800 км/с. В этот же временной интервал коронографом LASCO-SOHO был зарегистрирован гало-СМЕ, скорость которого была оце-

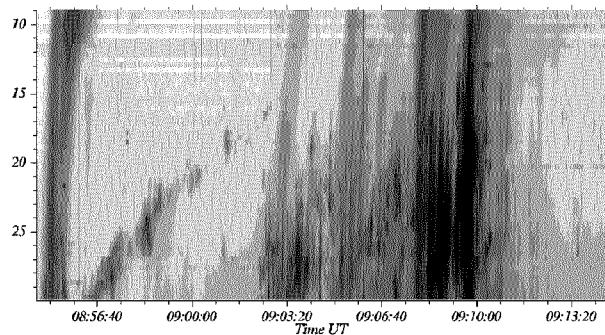


Рис. 12. Динамические спектры двух последовательных всплесков II типа

нена как 750 км/с. Так как гало-СМЕ's характеризуются примерно одинаковой скоростью распространения практически во всех направлениях, имеется хорошее соответствие скоростей, определенных в оптике и по радиоизмерениям.

Через 3 сут и 18 ч после начала первого всплеска II типа по данным мирового центра по геомагнетизму в Киото (WDC for Geomagnetism, Kyoto) была зарегистрирована магнитная буря с индексом $D_{st} = -80$ нТл (рис. 13). В предположении связи данного СМЕ (а следовательно, и всплесков II типа) с указанной геомагнитной бурей, расчетная средняя скорость СМЕ должна составлять около 500 км/с. Расхождение в оценках скорости СМЕ может быть объяснено тем, что по данным коронографа данный СМЕ характеризовался отрицательным ускорением, что могло привести к существенному уменьшению скорости на пути распространения в 1 АЕ. В указанный период времени космический аппарат WIND не зарегистрировал связанных со СМЕ всплесков в диапазоне частот 2 кГц—10 МГц, поэтому оценить скорость СМЕ на больших удалениях от Солнца не представлялось возможным. Различные скорости СМЕ могли быть также получены в случае, если как радио-, так и оптические инструменты определяли скорость участка СМЕ, распространявшегося под некоторым углом к направлению на Землю.

Как видно из рис. 13, в течение 22—27 июля того же года наблюдались три мощные магнитные бури с Dst до -200 нТл. В соответствующий период (17—26 июля) был зарегистрирован один всплеск II типа (21 июля в 10:05 UT) и несколь-

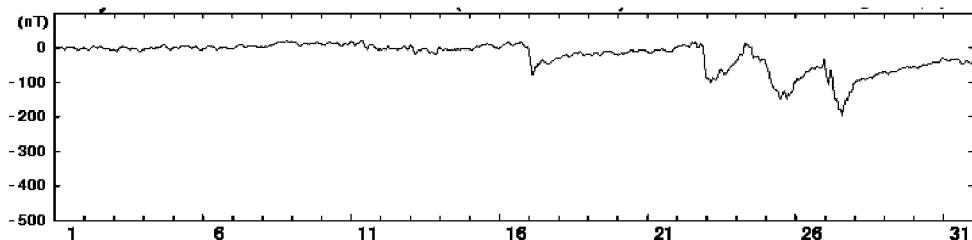


Рис. 13. Профиль индекса D_{st} (по оси абсцисс — день месяца)

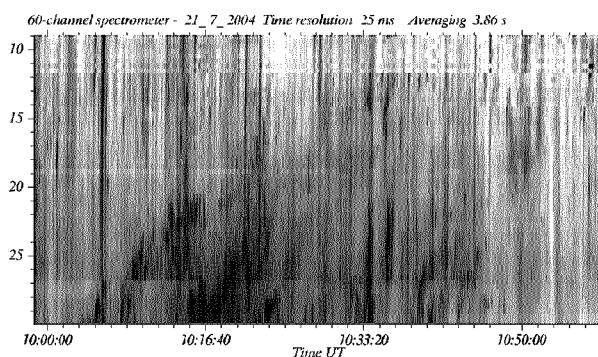


Рис. 14. Динамический спектр всплеска II типа (10:05—10:50 UT)

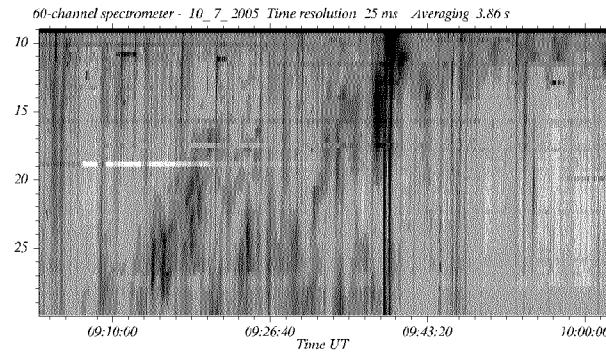


Рис. 15. Динамический спектр всплеска II типа с сильно выраженной тонкой структурой

ко всплесков IV типа как радиотелескопом УТР-2, так и космическим аппаратом WIND. Динамический спектр всплеска II типа показан на рис. 14. Он состоит из нескольких полос и имеет скорость частотного дрейфа -14 кГц/с, что соответствует скорости источника около 270 км/с. При такой скорости расчетное время прихода СМЕ к Земле составляет 6 сут и 6 ч, что соответствует середине суток 27 июля. Как видно из рис. 13, этому времени соответствует самая мощная буря в последовательности ($D_{st} = -200$ нТл).

Считается, что если источники всплесков II типа находятся на фронте ударной волны, вызванной СМЕ, то всплески IV генерируются непосредственно в теле СМЕ.

На рис. 15 показан динамический спектр всплеска II типа, состоящего из большого числа субвсплесков, подобных всплескам III типа. Всплеск прослеживается во всем диапазоне частот с 9:13 до 10:00 UT. Средняя скорость дрейфа всплеска составляет -30 кГц/с (соответственно

скорость СМЕ 720 км/с, время прихода к Земле 2 сут и 12 ч). Это время соответствует завершающей стадии серии магнитных бурь 9—13 июля 2005 г. со средним значением $D_{st} = -80$ нТл (рис. 16).

Одной из причин низкого уровня корреляции между зарегистрированными всплесками II типа и геомагнитными возмущениями является неточность в определении реального направления движения СМЕ. Коронографы дают лишь проекцию скорости движения СМЕ на картинную плоскость. Радионаблюдения могут дать значение проекции скорости СМЕ на направление градиента плотности корональной плазмы. Использование разнесенных вдоль орбиты Земли спутников проекта STEREO совместно с наземными инструментами позволит получить полную пространственную картину движения СМЕ.

Возможности эффективного взаимодействия радиотелескопа УТР-2 и космических аппаратов (в частности WIND) иллюстрируется динамическим спектром, который получен сопоставлени-

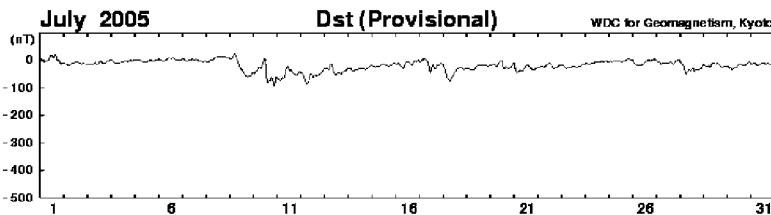


Рис. 16. Профиль индекса геомагнитной активности за июль 2005 г.

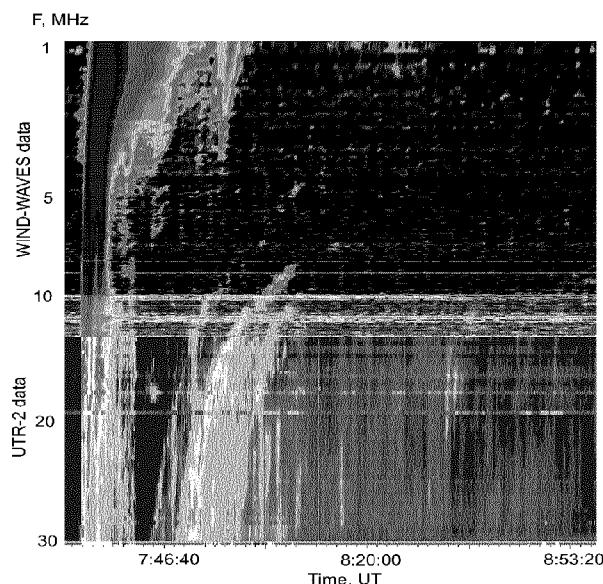


Рис. 17. Динамический спектр всплеска II типа, полученный по данным космического аппарата WIND и радиотелескопа УТР-2

ем данных двух инструментов (рис. 17). Рабочие полосы радиотелескопа УТР-2 и космического аппарата Wind являются смежными с небольшим перекрытием, что позволяет охватить широкий диапазон рабочих частот от 2 кГц до 30 МГц.

ВЫВОДЫ

Проведенные эксперименты подтвердили высокую эффективность декаметровых радиотелескопов УТР-2 и УРАН-2 для решения задач космической погоды. Наблюдения межпланетных мерцаний космических радиоисточников с

использованием дисперсионного и спектрального анализов, а также специального оборудования, разработанного для этих задач, позволили обнаружить высокоскоростные потоки солнечного ветра, связанные с выбросами корональных масс и корональными дырами, и исследовать их характеристики. Рекордно высокая в декаметровом диапазоне чувствительность радиотелескопа УТР-2 позволяет наблюдать около 10 мерцающих радиоисточников в течение одной ночи, что не обеспечивает высокого пространственного разрешения при картографировании межпланетного пространства. Реализация проекта гигантского радиотелескопа нового поколения с эффективной площадью 10^6 м^2 , который осуществляется в Радиоастрономическом институте НАНУ [8], даст возможность увеличить количество пригодных для просвечивания межпланетной среды радиоисточников как минимум на порядок и существенно улучшит пространственное разрешение карт гелиосферы.

При наблюдениях спорадического солнечного радиоизлучения удалось обнаружить и определить параметры ряда радиовсплесков II типа в широком диапазоне потоков — от 0.1 до 10000 с.е.п. ($1 \text{ с.е.п.} = 10^{-22} \text{ Вт}/\text{м}^2\text{Гц}$) на частотах от 9 до 32 МГц. Трем из четырнадцати зарегистрированных всплесков II и IV типов соответствовали сильные или умеренные геомагнитные бури. Недостаточно высокая корреляция между обнаружением радиовсплесков и возникновением геомагнитных бурь может быть связана с невозможностью на данном этапе исследований определять составляющую скорости распространения СМЕ в направлении Земли. Для большей надежности идентификации геоэффективных СМЕ на основе радионаблюдений необходимы измерения с пространственным разнесением. Такие наблюдения станут возможными при синхронной работе аппаратов проекта

STEREO и наземных радиотелескопов, в частности, УТР-2. Пример дополнения данных, полученных на УТР-2 и аппаратом WIND, яркое тому подтверждение.

Работа выполнялась при частичной финансовой поддержке программы фундаментальных исследований Национальной академии наук Украины «Разработка теории, методов и информационных технологий комплексного изучения солнечно-земных связей как основы прогнозирования «космической погоды», а также гранта INTAS 03-5727.

1. Алексеев Г. А., Гельфрейх Г. Б., Зайцев В. В. и др. Советские радиотелескопы и радиоастрономия Солнца. — М.: Наука, 1990.—212 с.
2. Брауде С. Я., Галанин В. В., Инютин Г. А. и др. Турбулентная структура солнечного ветра по наблюдениям в декаметровом диапазоне радиоволн // Астрон. журн.—1995.—72, № 5.—С. 761—766.
3. Брауде С. Я., Мень А. В., Содин Л. Г. // Антенны / Под. ред. А. А. Пистолькорса. — М.: Связь, 1978.—Вып. 26.—С. 3—15.
4. Виткевич В. В., Власов В. И. Характеристики межпланетных электронных неоднородностей по наблюдениям 1967—1969 гг. // Астрон. журн.—1972.—49, вып. 3.—С. 595—606.
5. Власов В. И. Межпланетные ударные волны по наблюдениям мерцаний радиоисточников // Геомагнетизм и аэрономия.—1981.—21, № 5.—С. 927—929.
6. Власов В. И. Радиоастрономические наблюдения межпланетной ударной волны от солнечной вспышки 18 августа 1979 г. // Геомагнетизм и аэрономия.—1986.—26, № 2.—С. 182—186.
7. Ефимов А. И., Лотова Н. А. Статистический анализ пространственно-временной структуры солнечного ветра // Геомагнетизм и аэрономия.—1978.—18, № 6.—С. 998—1001.
8. Коноваленко А. А. Перспективы низкочастотной радиоастрономии // Радиофизика и радиоастрономия.—2005.—10, спец. вып.—С. S86—114.
9. Лотова Н. А. Радиоастрономические исследования струйной структуры солнечного ветра // Итоги науки и техники / ВИНИТИ. Астрономия.—1988.—33.—С. 121—149.
10. Мень А. В., Брауде С. Я., Ращковский С. Л. и др. Система декаметровых радиоинтерферометров УРАН. Ч. I. Обзор // Радиофизика и радиоастрономия.—1997.—2, № 4.—С. 385—390.
11. Ольяк М. Р. Об использовании методов статистической радиофизики для анализа межпланетных мерцаний в декаметровом диапазоне радиоволн // Вестник Харьков. нац. ун-та.—2002.—№ 570, вып. 2.—С. 210—211.
12. Ольяк М. Р. Об особенностях применения метода дисперсионного анализа при исследовании солнечного ветра // Радиофизика и радиоастрономия.—2005.—10, № 4.—С. 385—391.
13. Фалькович И. С., Гридин А. А., Калениченко Н. Н., Бубнов И. Н. Шестнадцатиполосный корреляционный радиометр для наблюдения межпланетных мерцаний // Радиофизика и радиоастрономия.—2005.—10, № 4.—С. 392—397.
14. 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.—9, № 2.—С. 121—129.
15. Gopalswamy N., Yashiro S., Akiyama S. Geoeffectiveness of halo coronal mass ejections // J. Geophys. Res.—2007.
16. Gopalswamy N., et al. Type II radio bursts and energetic solar eruptions // J. Geophys. Res.—2005.—110.—P. 1040—1045.
17. Hayashi K., Kojima M., Tokumaru M., Fujiri K. MHD tomography using interplanetary scintillation measurement // Geophys. Res.—2003.—108, N A3.—P. 1102—1123.
18. Kukushkin A., Olyak M. Propagation effects in the radio interferometry of polarized radiation // Waves in Random Media.—1994.—4, N 1.—P. 59—81.
19. Mel'nik V. N., Konovalenko A. A., Rucker H. O., et al. Observations of solar type II bursts at frequencies 10—30MHz // Solar Phys.—2004.—222, N 1.—P. 151—166.
20. Mel'nik V. N., et al. Observations of solar type II bursts at frequencies 10—30 MHz // Solar Phys.—2004.—222, N 1.—P. 151—166.
21. Moore V., Harrison R. A. A characterization of discrete solar wind events detected by interplanetary scintillation mapping // J. Geophys. Res.—1994.—99, N A1.—P. 27—33.
22. New digital spectrometers for ground based decameter radio astronomy / Kleewein P., Rosolen C., Lecacheux A. // Planetary Radio Emissions IV. / Eds H. O. Rucker, S. J. Bauer, A. Lecacheux. — Vienna: Austrian Academy of Sciences Press, 1997.—P. 349—358.
23. Reiner M. J. Interplanetary Type II Radio Emissions Associated With CMEs, in «Radio Astronomy at Long Wavelengths» // Geophysical Monograph 119.—2000.—P. 137—146.

SPACE WEATHER BY IPS AND SOLAR RADIO EMISSION OBSERVATIONS AT DECAMETRE RADIO WAVELENGTHS

I. S. Falkovich, N. N. Kalinichenko, A. A. Konovalenko, L. N. Litvinenko, V. N. Melnik, M. P. Olyak, V. V. Dorovskii, A. A. Gridin, I. N. Bubnov, A. I. Brazhenko

The results of interplanetary scintillations and solar radio emission observations with the radio telescopes UTR-2 and URAN-2 are presented. High efficiency of observations at decametre radio waves for solar wind studies and establishing the geoefficiency of different types of coronal mass ejections is shown.