

УДК 523.164.42

Н. Н. КАЛИНИЧЕНКО<sup>1</sup>, А. А. КОНОВАЛЕНКО<sup>1</sup>,  
А. И. БРАЖЕНКО<sup>2</sup>, В. В. СОЛОВЬЕВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Радиоастрономический институт НАН Украины,  
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина  
E-mail: kalinich@rian.kharkov.ua`

<sup>2</sup> Полтавская гравиметрическая обсерватория Института геофизики  
им. С. И. Субботина НАН Украины,  
ул. Мясоедова, 27/29, г. Полтава, 36029, Украина

## КОРОНАЛЬНЫЙ ВЫБРОС МАССЫ 15 ФЕВРАЛЯ 2011 Г. В МЕЖПЛАНЕТНОМ ПРОСТРАНСТВЕ И ЕГО НАБЛЮДЕНИЯ МЕТОДОМ МЕРЦАНИЙ КОСМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ В ДЕКАМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ РАДИОВОЛН

*Показана высокая эффективность метода межпланетных мерцаний космических источников в декаметровом диапазоне радиоволн для обнаружения корональных выбросов массы за орбитой Земли. Установлено, что на расстояниях от Солнца  $1 \div 1.7$  а. е. корональный выброс массы в межпланетном пространстве продолжает замедляться, при этом скорость его распространения стремится к скорости окружающего невозмущенного солнечного ветра, а угловой размер составляет не менее  $66^\circ$ .*

*Ключевые слова:* межпланетные мерцания, корональный выброс массы, декаметровый диапазон

### 1. Введение

Корональные выбросы массы (КВМ) – это гигантские облака солнечного вещества (массой порядка  $10^{13} \div 10^{15}$  кг) и магнитного поля, выбрасываемые взрывным путем (начальная скорость до 2000 км/с) из атмосферы Солнца в результате происходящих в ней активных процессов [1]. Оказавшись в межпланетном пространстве, КВМ нарушают структуру солнечного ветра и могут приводить к возмущениям земной магнитосферы в случае движения в сторону Земли. КВМ, наряду с солнечными вспышками (причинная связь между КВМ и солнечными вспышками до настоящего времени остается не совсем понятной), играют определяющую роль в формировании космической погоды, а поэтому исследования свойств КВМ весьма актуальны. К настоящему времени значительный объем информации о КВМ вблизи Солнца (на расстояниях в десятки солнечных радиусов от Солнца) получен с помощью космических коронографов, таких как коронограф LASCO C2 (The Large Angle and Spectrometric Coronagraph), размещенный на борту космического аппарата (КА) “СОХО” (SOHO – Solar and Heliospheric Observatory) [2]. Наблюдения мерца-

ний излучения космических радиоисточников на неоднородностях межпланетной плазмы, проводившиеся на рабочих частотах  $f > 100$  МГц на элонгациях (угол между направлением на Солнце и направлением на просвечивающий радиоисточник)  $\epsilon < 90^\circ$ , показали, что метод мерцаний позволяет получать важную информацию о КВМ в межпланетном пространстве на расстояниях до 1 а. е. от Солнца (об их форме, скорости, направлении движения) [3, 4]. По ряду причин свойства КВМ на расстояниях от Солнца больше 1 а. е. плохо изучены. В частности, радиоизлучение с частотой  $f > 100$  МГц слабо рассеивается существенно более разреженной плазмой в этой области гелиосферы, а дальние космические миссии достаточно редки. Декаметровый диапазон ( $f = 10 \div 30$  МГц) открывает уникальные возможности для исследований солнечного ветра на больших расстояниях от Солнца путем наблюдений межпланетных мерцаний космических радиоисточников, поскольку на этих частотах индекс межпланетных мерцаний  $m$  принимает существенные значения во всем диапазоне элонгаций  $90^\circ < \epsilon < 180^\circ$  (большие элонгации соответствуют большим расстояниям от Солнца) [5, 6].

Цель настоящей работы – оценить эффективность метода мерцаний в декаметровом диапазоне радиоволн для обнаружения КВМ в меж-

© Н. Н. Калиниченко, А. А. Коноваленко, А. И. Браженко,  
В. В. Соловьев, 2013

планетном пространстве, изучить динамику КВМ и определить их угловые размеры на расстояниях больше 1 а. е. от Солнца.

## 2. Наблюдения

24-й цикл солнечной активности, который должен был начаться в конце 2005 г. – начале 2006 г., начался только в 2008 г. (если оценивать по смене магнитных полюсов Солнца), при этом начальный период цикла характеризовался исключительно низкой солнечной активностью. Только 15 февраля 2011 г. в 01:57 UT (UT – всемирное время) в активной области 1158 произошла вспышка в рентгеновском диапазоне класса X. Это была первая вспышка такого класса с декабря 2006 г. Рентгеновская вспышка сопровождалась КВМ, который был зарегистрирован коронографами космических аппаратов “Стерео” и “СОХО” (рис. 1). Обработка данных коронографов космических аппаратов “Стерео-А” и “Стерео-В” позволила оценить скорость КВМ вблизи Солнца (около 1000 км/с), угловой размер конуса, в котором двигался КВМ ( $65^\circ \div 85^\circ$ ), и направление движения КВМ (строго в сторону Земли) [7]. КВМ, произошедший 15 февраля 2011 г., достиг орбиты Земли в 01:30 UT 18 февраля 2011 г. Вблизи Земли КВМ в межпланетном пространстве обнаруживал себя в данных анализаторов параметров плазмы на бор-

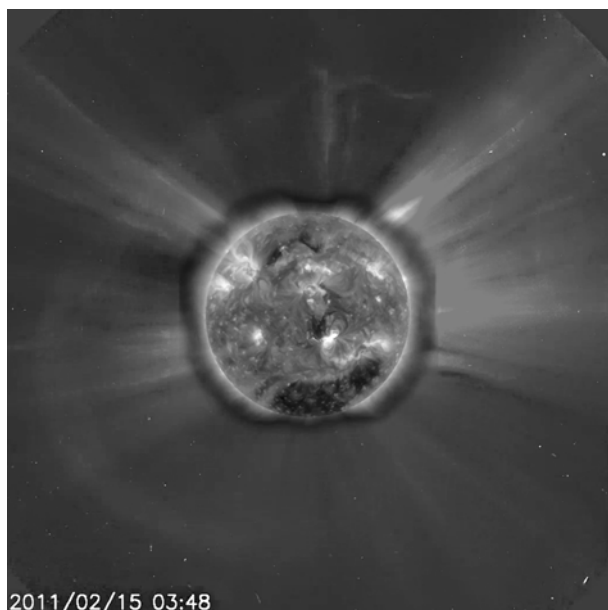


Рис. 1. КВМ 15 февраля 2011 г. по наблюдениям КА “СОХО” (коронограф LASCO C2)

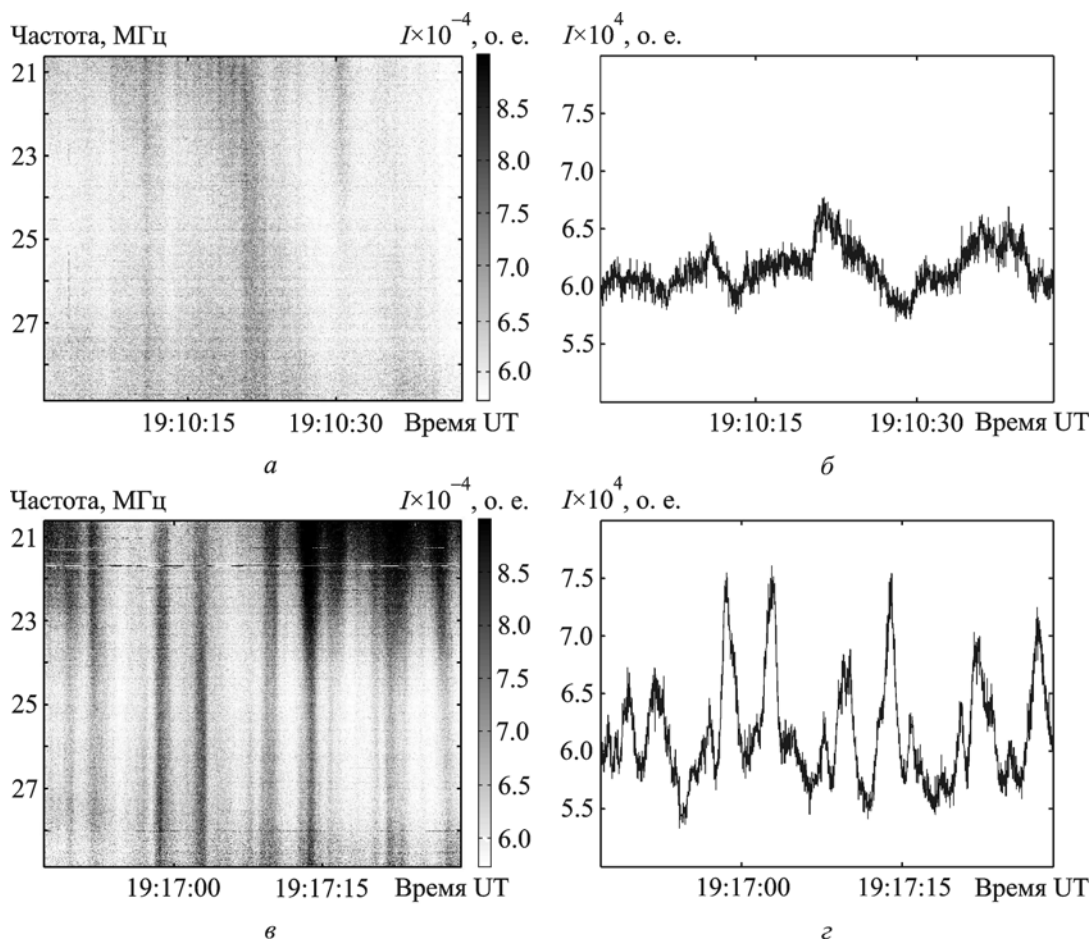
ту КА “СОХО”, “Винд” (Wind) и других в виде резкого увеличения концентрации (с единиц до десятков частиц в кубическом сантиметре), скорости (с 350 до  $500 \div 600$  км/с), температуры (с  $3 \cdot 10^4$  до  $10^6$  К) протонов солнечного ветра, напряженности межпланетного магнитного поля (с 5 до 35 нТл). Приход КВМ вызвал слабую геомагнитную бурю класса G1.

Наблюдения мерцаний на радиотелескопах УТР-2 (Харьковская обл.) [8] и УРАН-2 (Полтавская обл.) [9] проводились ежедневно с 16 по 22 февраля 2011 г. Наблюдались 3 самых мощных и хорошо мерцающих в декаметровом диапазоне радиосточника: остаток вспышки сверхновой 3С144 (поток излучения мерцающей компоненты порядка 1000 Ян на частоте 25 МГц, время кульминации в период наблюдений  $\approx 19:20$  LT, LT – местное время), квазар 3С196 (поток – 130 Ян, время кульминации  $\approx 22:00$  LT) и квазар 3С273 (поток – 170 Ян, время кульминации  $\approx 02:00$  LT). Радиосточники наблюдались в интервале часовых углов  $\pm 1^h$  вблизи верхней кульминации сканами по 4 мин на элонгациях  $\epsilon \approx 114^\circ, 136^\circ$  и  $143^\circ$  соответственно.

На радиотелескопе УТР-2 данные регистрировались цифровым спектральным анализатором DSP-z [10] в полосе частот  $20.63 \div 28.88$  МГц с постоянной времени  $t_{yc} = 20$  мс. Запись данных на радиотелескопе УРАН-2 производилась с теми же параметрами с помощью 16-канального широкополосного корреляционного радиометра [11]. На рис. 2 показан пример реализаций процесса мерцаний, которые были получены на радиотелескопе УТР-2 вблизи 19:00 LT 17 и 18 февраля 2011 г. при наблюдении радиосточника 3С144. В указанное время 17 февраля 2011 г. КВМ находился на расстоянии порядка 0.1 а. е. от Земли, а следовательно, отсутствовал на луче зрения от наблюдателя до радиосточника (элонгация радиосточника 3С144 на момент наблюдений  $\epsilon \approx 114^\circ$ ). В то же время 18 февраля 2011 г. КВМ уже пересек орбиту Земли и в течении приблизительно 15.5 ч двигался за ее орбитой, пересекая луч зрения, направленный на радиосточник. Видно, что характер мерцаний в указанные дни наблюдений заметно отличается.

## 3. Обработка данных

Обработка экспериментальных данных состояла в оценке энергетического спектра  $P(\nu)$  и индек-



**Рис. 2.** Пример реализаций процесса мерцаний, которые были получены на радиотелескопе УТР-2 из наблюдений радиоисточника 3С144 вблизи 19:00 LT 17 и 18 февраля 2011 г.: *a* и *c* – динамические спектры мерцаний (интенсивность в зависимости от времени и частоты) 17 и 18 февраля соответственно, *b* и *d* – соответственно сечения этих динамических спектров на частоте 25 МГц

са мерцаний  $m$ . Энергетический спектр мерцаний оценивался по формуле [12]:

$$P(\nu) = |F(\nu)|^2 / T,$$

где  $F(\nu)$  – преобразование Фурье процесса флуктуаций интенсивности радиоисточника  $I(t)$ ,  $\nu$  – частота мерцаний,  $T$  – длительность реализации. Выбирались коррелированные реализации длительностью  $T = 40$  с, полученные на радиотелескопах УТР-2 и УРАН-2 (база 152 км).

На рис. 3 представлены усредненные энергетические спектры мерцаний радиоисточника 3С144, полученные на интервале “время кульминации  $\pm 1$  ч” (время LT). Видно, что спектры, полученные 18, 19 и 20 февраля (сплошные линии), шире спектров, полученных 16 и 17 февраля 2011 г. (пунктирные линии).

Индекс мерцаний рассчитывался по формуле:

$$m = \frac{\sigma_m}{I(t)} = \frac{\sqrt{\sigma_{(m+\text{ш})}^2 - \sigma_{\text{ш}}^2}}{I(t)}, \quad (1)$$

где  $\overline{I(t)}$  – средняя интенсивность радиоисточника, включающая вклад как мерцающей, так и немерцающей (протяженной) компоненты;  $\sigma_m^2$ ,  $\sigma_{\text{ш}}^2$ ,  $\sigma_{(m+\text{ш})}^2$  – дисперсии процессов мерцаний, шума и их суммы. Дисперсии  $\sigma_{(m+\text{ш})}^2$  и  $\sigma_{\text{ш}}^2$  в формуле (1) определялись из энергетических спектров мерцаний путем интегрирования соответствующих частей спектра:

$$\sigma_{(m+\text{ш})}^2 = \int_{1/T}^{1/t_{\text{yc}}} P_{m+\text{ш}}(\nu) d\nu, \quad \sigma_{\text{ш}}^2 = \int_{1/T}^{1/t_{\text{yc}}} P_{\text{ш}}(\nu) d\nu,$$

где  $P_{m+\text{ш}}$  – энергетический спектр мерцаний;  $P_{\text{ш}}$  – область энергетического спектра мерцаний  $P_{m+\text{ш}}$ ,

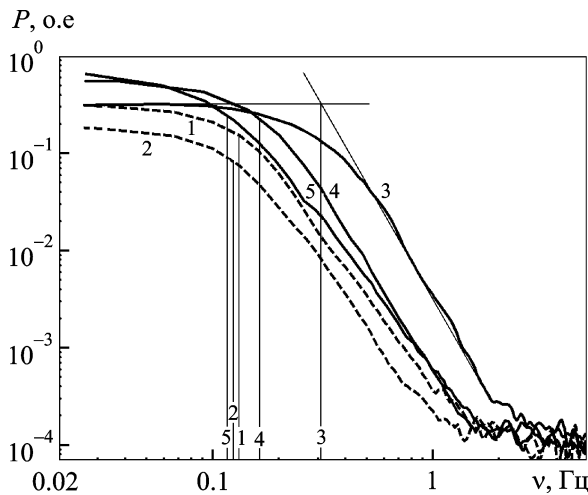


Рис. 3. Энергетические спектры мерцаний радиосточника 3C144 и их френелевские частоты вблизи 19:00 LT 16–20 февраля 2011 г.: кривая 1 – 16.02.2011 г., кривая 2 – 17.02.2011 г., кривая 3 – 18.02.2011 г., кривая 4 – 19.02.2011 г., кривая 5 – 20.02.2011 г.

обусловленная шумом. Индексы мерцаний, полученные по отдельным реализациям на протяжении сессии наблюдений радиосточника в течение двух часов, усреднялись.

На рис. 4 показаны индексы межпланетных мерцаний радиосточников 3C144, 3C196, 3C273 в период с 16 по 22 февраля 2011 г. Значения времени соответствуют середине временного интервала, в течение которого наблюдался тот или иной радиосточник (момент кульминации). Четко видно резкое (в два раза) увеличение индексов мерцаний наблюдавшихся радиосточников с 18 по 19 февраля 2011 г., а затем медленное их уменьшение в последующие двое суток.

#### 4. Анализ данных

Прежде чем приступить к анализу динамики КВМ на расстояниях  $R > 1$  а. е. от Солнца, оценим положение и толщину слоя межпланетной плазмы, который вносит максимальный вклад в мерцания на дециметровых радиоволнах на больших элонгациях между Солнцем и радиосточником в случае спокойного сферически-симметричного солнечного ветра (отсутствия КВМ в межпланетном пространстве на луче зрения, направленного на радиосточник). Ранее было показано [5, 6], что на элонгациях  $\epsilon > 90^\circ \div 110^\circ$  (что выполняется для всех наблюдавшихся радиосточников) реализуется режим слабых мерцаний,  $m \ll 1$ . Это означает, что эффект

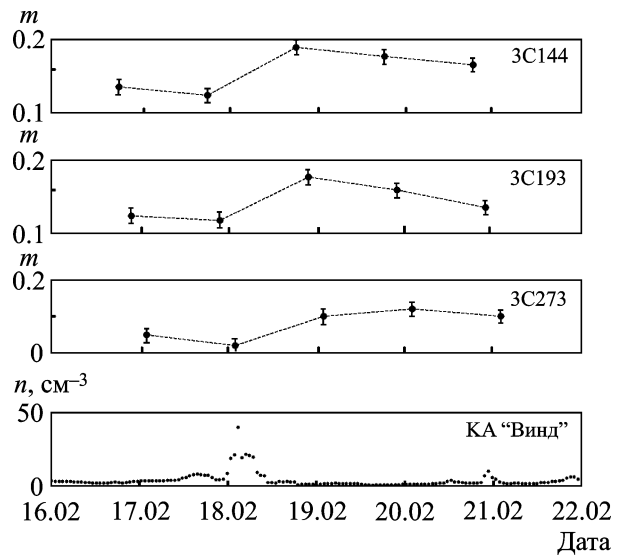


Рис. 4. Индексы межпланетных мерцаний радиосточников 3C144, 3C196 и 3C273, наблюдавшихся на радиотелескопах УТР-2 и УРАН-2 в период с 16 по 22 февраля 2011 г. На нижней панели рисунка приведена концентрация протонов солнечного ветра вблизи орбиты Земли в тот же период по наблюдениям КА “Винд”

влияния всей среды, лежащей на луче зрения, на источник есть сумма вкладов отдельных тонких слоев, ее составляющих, при этом для некоторого слоя толщиной  $dz$ , расположенного на расстоянии  $z$  от наблюдателя (в нашем случае – от Земли), спектр флуктуаций интенсивности радиосточника может быть представлен в виде [13]:

$$\Phi'_1(q, z) dz = 2\pi(\lambda r_e)^2 \Phi_{Ne}(q_x, q_y, q_z = 0, z) \times F_{Фр}(q_x, q_y, z) F_{ист}(q_x, q_y, z) dz.$$

Здесь  $\lambda$  – длина волны,  $r_e$  – радиус электрона;  $x$  и  $y$  – координаты в картинной плоскости,  $z$  – координата вдоль луча зрения;  $q = (q_x^2 + q_y^2 + q_z^2)^{1/2}$  – пространственная частота;  $\Phi_{Ne}(q_x, q_y, q_z = 0, z)$  – пространственный спектр турбулентности (имеет степенной вид,  $\Phi_{Ne}(q) \propto q^{-n}$ , показатель спектра турбулентности межпланетной плазмы  $n \approx 3 \div 4$ ). Вклад каждого слоя определяется силой турбулентности, которая быстро убывает с расстоянием от Солнца как  $R^{-4}$ . С учетом вышесказанного формулу для пространственного спектра турбулентности можно записать в виде  $\Phi_{Ne}(q) \propto R^{-4} q^{-n}$ . Выражение  $F_{Фр}(q_x, q_y, z) = 4 \sin^2(q^2 z \lambda / (4\pi))$  – фильтр Френеля. Фильтр Френеля ослабляет вклад пространственных частот, меньших, чем  $q_{Фр} \approx$

$(4\pi/(\lambda z))^{1/2}$ . Множитель  $F_{\text{ист}}(q_x, q_y, z)$  – это квадрат углового спектра радиоисточника, который для симметричного гауссовского распределения яркости по источнику в виде  $\exp(-\theta^2/2\theta_0^2)$  записывается как  $F_{\text{ист}}(q, z) = \exp(-q^2 z^2 \theta_0^2)$ . Этот множитель работает как фильтр нижних частот, подавляя пространственные частоты выше  $q = 1/(z\theta_0)$ . Обычно принимают  $\theta_0 \approx \theta_s/2.35$ , где  $\theta_s$  – угловой размер радиоисточника по половинному уровню.

Таким образом, энергетический спектр мерцаний на отдельном тонком слое может быть представлен в виде:

$$P(v, z)dz = \frac{2\pi}{V_{\perp}(z)} \iint \Phi'_1(q_x = 2\pi v/V_{\perp}, q_y, z) dq_y dz,$$

где  $V_{\perp}$  – проекция скорости солнечного ветра на картинную плоскость.

Если провести интегрирование энергетического спектра мерцаний на отдельном тонком слое по переменной  $v$ , то можно получить вклад элементарного слоя толщиной  $\Delta z$  со средней координатой  $z$  в наблюдаемую дисперсию процесса мерцаний. Отношение этой величины к ее максимальному значению на луче зрения даст эффективность слоя  $z$ . Нормируя ее на максимальное значение по всем лучам зрения (элонгациям), получим относительную эффективность.

На рис. 5 представлен результат расчета относительной эффективности слоев межпланетной плазмы за орбитой Земли в плоскости эклиптики для  $\Delta z = 0.03$  а. е., рабочей частоты 25 МГц, радиально направленной скорости солнечного ветра  $V = 400$  км/с, показателя спектра турбулентности межпланетной плазмы  $n = 3.6$  и радиоисточника с угловым размером  $2''$ . Из рис. 5, а видно, что слой плазмы, обладающий эффективностью  $0.7 \div 1$ , имеет разную толщину. На малых элонгациях он очень маленький (меньше 0.1 а. е. на элонгации  $\epsilon \approx 90^\circ$ ), а затем увеличивается с элонгацией до 0.5 а. е. В зависимости от элонгации несколько меняется также положение слоя плазмы, который вносит максимальный вклад в индекс мерцаний, от 0.6 до 1 а. е. Относительно низкая эффективность слоев межпланетной плазмы на элонгациях  $\epsilon > 170^\circ$  объясняется геометрическим эффектом, стремлением к нулю проекции скорости солнечного ветра на картинную плос-

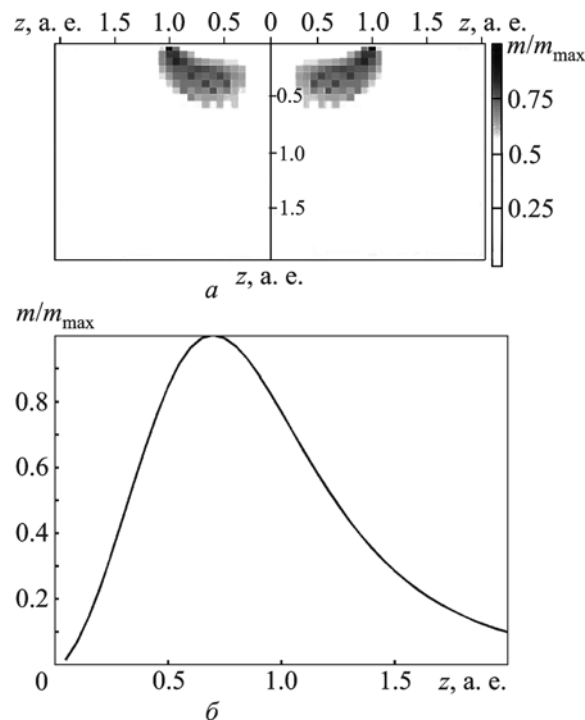


Рис. 5. Относительная эффективность слоев межпланетной плазмы: а – за орбитой Земли в плоскости эклиптики (0,0 – положение Земли,  $z$  – расстояние от Земли до рассеивающего слоя), б – в направлении на радиоисточник 3C144 ( $\epsilon = 114^\circ$ )

кость  $V_{\perp}$ . На рис. 5, б показана относительная эффективность слоев межпланетной плазмы в направлении на радиоисточник 3C144 ( $\epsilon = 114^\circ$ ). Максимально эффективный слой расположен на расстоянии  $z \approx 0.7$  а. е. от Земли.

Перейдем теперь к определению расстояния до максимально эффективного слоя в дни, когда наблюдалось увеличение индекса межпланетных мерцаний, а именно – 18, 19 и 20 февраля 2011 г. Сначала из экспериментальных энергетических спектров мерцаний оценивалась частота среза фильтра Френеля  $\nu_{\text{Фр}}$ . Обычно  $\nu_{\text{Фр}}$  определяется по точке пересечения прямых, аппроксимирующих низко- и высокочастотную части спектра (так, как это показано для спектра 3 на рис. 3). Применение такой процедуры определения  $\nu_{\text{Фр}}$  можно найти, например, в работе [14]. Для радиоисточника 3C144  $\nu_{\text{Фр}} \approx 0.3, 0.15$  и  $0.12$  Гц для 18, 19 и 20 февраля соответственно (см. рис. 3).

Далее использовалась формула, связывающая частоту  $\nu_{\text{Фр}}$  со скоростью  $V_{\perp}$  и расстоянием до рассеивающего слоя вдоль луча зрения, направленного на источник,  $z$ :

$$v_{\text{Фр}} = \frac{V_{\perp}}{\sqrt{2\pi\lambda z}}$$

Откуда получаем

$$z = \frac{V_{\perp}^2}{2\pi\lambda v_{\text{Фр}}^2} \quad (2)$$

В расчетах по формуле (2) значения проекции скорости  $V_{\perp}$  брались из измерений на базе УТР-2 – УРАН-2 с учетом радиального направления вектора полной скорости солнечного ветра и геометрии эксперимента. Для радиосточника 3С144 18, 19 и 20 февраля  $z \approx 0.2, 0.6$  и  $1.0$  а. е., а для 3С273 –  $0.1, 0.4$  и  $0.7$  а. е. соответственно. Полученные значения расстояния до максимально эффективного слоя для 18 и 20 февраля существенно отличаются от значений, которые следовало бы ожидать в случае невозмущенного солнечного ветра (рис. 5). Этот факт, а также последовательное увеличение  $z$  в смежные дни 18, 19 и 20 февраля 2011 г., когда возмущение удалялось от Солнца, мы связываем с эффектом КВМ в межпланетном пространстве. Такое предположение подтверждается также рядом косвенных фактов. Во-первых, как было показано выше по данным КА “Винд” (рис. 4, нижняя панель), плазма в области сжатия КВМ в 10 раз более плотная, чем плазма окружающего невозмущенного солнечного ветра. Таким образом, подавляющий вклад в мерцания в нашем случае вносит именно плазма КВМ (более точно – плазма в области сжатия, расположенной между телом КВМ и ударной волной). Во-вторых, энергетические спектры мерцаний, наблюдавшихся в эти дни, имеют в области частоты Френеля достаточно резкий переход от плоской низкочастотной до спадающей высокочастотной части, что есть аргументом в пользу компактности рассеивающей области на луче зрения (область сжатия КВМ в межпланетном пространстве имела размеры  $\approx 0.1$  а. е., см. рис. 4, нижнюю панель).

Далее, по расстоянию  $z$  оценивалось расстояние от Солнца до КВМ в межпланетном пространстве по формуле  $R_{\text{КВМ}} = \sqrt{1+z^2} - 2z \cos \epsilon$  (в астрономических единицах). Значения  $R_{\text{КВМ}}$ , полученные по наблюдениям двух радиосточников, лучи зрения на которые лежат в плоскости эклиптики (3С144 и 3С273), усреднялись с учетом разницы во времени наблюдений (радиосточник 3С273 наблюдался через шесть с половиной ча-

сов после радиосточника 3С144, поэтому расстояние до КВМ, определенное по данным наблюдений радиосточника 3С273, пересчитывалось ко времени наблюдений радиосточника 3С144, а уже затем проводилась процедура усреднения). На рис. 6 показано положение КВМ в межпланетном пространстве за орбитой Земли в 18:30 LT 18, 19 и 20 февраля 2011 г. Значения  $R_{\text{КВМ}} \approx 1.1, 1.4$  и  $1.7$  а. е. соответственно. Зная  $R_{\text{КВМ}}$  и время движения, можно оценить скорость КВМ в межпланетном пространстве на расстояниях  $1 \div 1.7$  а. е. Она оказалась равной  $(480 \pm 50)$  км/с, что ниже средней скорости движения на отрезке Солнце – Земля (540 км/с). Таким образом, за орбитой Земли скорость движения КВМ продолжала уменьшаться. Природа такого замедления – передача в области ударной волны энергии КВМ окружающему солнечному ветру, при этом возрастает энтропия и кинетическая энергия последнего.

Угловой размер рассматриваемого КВМ в межпланетном пространстве на расстояниях  $1 \div 1.7$  а. е. оказался не менее  $66^\circ$ , что хорошо согласуется с данными КА “Стерео” ( $65^\circ \div 85^\circ$ ), полученными вблизи Солнца. Этот факт является подтверждением правильности конической модели распространения КВМ [7]. В рамках этой модели предполагается, что в межпланетном пространстве КВМ движется строго по ради-

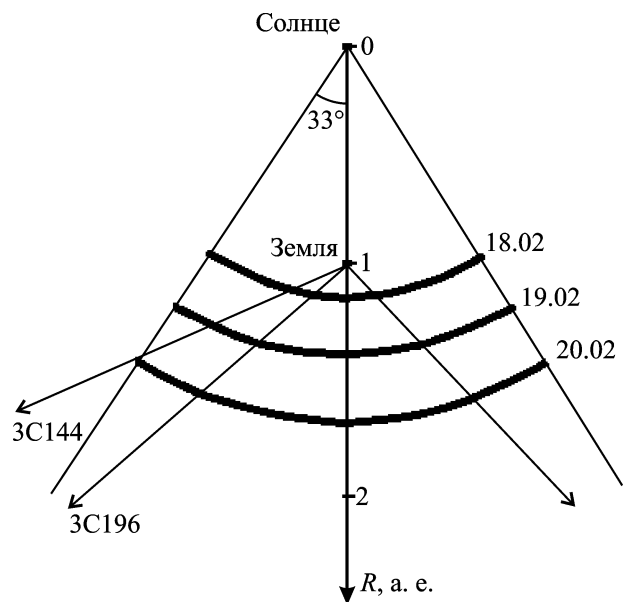


Рис. 6. Положение КВМ, произошедшего 15 февраля 2011 г., в межпланетном пространстве за орбитой Земли (жирные кривые) по наблюдениям межпланетных мерцаний 18, 19 и 20 февраля 2011 г.

узу от Солнца в направлении Земли внутри конуса с постоянной угловой шириной, имея при этом также радиально направленную скорость.

## 5. Выводы

1. Наблюдения мерцаний компактных радиоисточников в декаметровом диапазоне радиоволн позволяют надежно обнаруживать КВМ в межпланетном пространстве.

2. Слой межпланетной плазмы, который вносит максимальный вклад в мерцания на декаметровых радиоволнах в случае спокойного сферически-симметричного солнечного ветра, в зависимости от элонгации расположен на расстоянии  $0.7 \pm 1$  а. е. от Земли.

3. Моделирование КВМ в межпланетном пространстве тонким рассеивающим слоем является удачным подходом при изучении его динамики, поскольку область сжатия, которая расположена между телом КВМ и ударной волной, достаточно компактна и содержит существенно более плотную плазму, чем окружающий невозмущенный солнечный ветер. В случае, когда интерес представляют такие параметры потока, как протяженность и распределение концентрации частиц в потоке, следует применять модели, которые учитывают протяженность среды [15, 16].

4. В интервале расстояний от Солнца  $1 \pm 1.7$  а. е. КВМ в межпланетном пространстве продолжает замедляться, при этом скорость его распространения стремится к скорости окружающего невозмущенного солнечного ветра. На больших расстояниях от Солнца, когда скорость движения КВМ становится порядка суммы скоростей окружающего невозмущенного солнечного ветра ( $\approx 350$  км/с) и скорости распространения быстрой магнитозвуковой волны ( $\approx 50$  км/с), область возмущения на границе КВМ будет распространяться в виде магнитогидродинамической волны.

5. Угловой размер КВМ в рассматриваемом интервале расстояний от Солнца оказался не менее  $66^\circ$ , что хорошо согласуется со значением, полученным КА “Стерео” вблизи Солнца. Последний факт может служить подтверждением правильности конической модели распространения КВМ в межпланетном пространстве.

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

Авторы выражают благодарность А. А. Станиславскому за полезные замечания и обсуждения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Brueckner G. E.* The Behaviour of the Outer Solar Corona ( $3 R_{\text{sun}}$  to  $10 R_{\text{sun}}$ ) during a Large Solar Flare Observed from OSO-7 in White Light /In. G. Newkirk, Jr., editor. Coronal Disturbances: Proc. of I AU Symposium No. 57. – Dordrecht–Boston: Reidel, 1974. – P. 334.
2. Solar and Heliospheric Observatory Homepage. Available from: <http://sohowww.nascom.nasa.gov/home.html>
3. *Manoharan P. K., Tokumaru M., Pick M., Subramanian P., Ipavich F. M., Schenk K., Kaiser M. L., Lepping R. P., and Vourlidas A.* Coronal mass ejection of 2000 July 14 flare event: imaging from near-sun to Earth environment // *Astrophys. J.* – 2001. – Vol. 559, No. 2. – P. 1180–1189.
4. *Manoharan P. K.* Ooty interplanetary scintillations – remote sensing observations and analysis of coronal mass ejections in the Heliosphere // *Sol. Phys.* – 2010. – Vol. 265, Iss. 1–2. – P. 137–157.
5. *Bovkoon V. P. and Zhouck I. N.* Scintillations of cosmic radio sources in the decametre waveband // *Astrophys. Space Sci.* – 1981. – Vol. 79, Is. 1. – P. 165–180.
6. *Калиниченко Н. Н.* Мерцания космического радиоисточника 4C21.53 в декаметровом диапазоне волн на элонгациях  $43^\circ$ – $138^\circ$  // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2011. – Т. 16, № 4. – С. 386–393.
7. *Lee C. O., Arge C. N., Odstrcil D., Millward G., Pizzo V., Quinn J. M., and Henney C. J.* Ensemble modeling of CME propagation // *Sol. Phys.* – 2013. – Vol. 285, Is. 1. – P. 349–368.
8. *Брауде С. Я., Мень А. В., Содин Л. Г.* Радиотелескоп декаметрового диапазона волн УТР-2 // *Антенны.* – Москва: Связь. – 1978. – Вып. 26. – С. 3–15.
9. *Мень А. В., Шарыкин Н. К., Захаренко В. В., Булацен В. Г., Браженко А. И., Ваццишин Р. В.* Радиотелескоп декаметрового диапазона волн УРАН-2 // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2003. – Т. 8, № 4. – С. 345–356.
10. *Ryabov V. B., Vavriv D. M., Zarka P., Ryabov B. P., Kozhin R. V., Vinogradov V. V., and Denis L.* A low-noise, high-dynamic-range, digital receiver for radio astronomy applications: an efficient solution for observing radio-bursts from Jupiter, the Sun, pulsars, and other astrophysical plasmas below 30 MHz // *Astron. Astrophys.* – 2010. – Vol. 510. – id. A16, doi:10.1051/004–6361/20091335.
11. *Фалькович И. С., Гридин А. А., Калиниченко Н. Н., Бубнов И. Н.* Шестнадцатиполосный корреляционный радиометр для наблюдения межпланетных мерцаний // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2005. – Т. 10, № 4. – С. 392–397.
12. *Марпл С. Л.* Цифровой спектральный анализ и его приложения. – М.: Мир, 1990. – 584 с.
13. *Cronyn W. M.* The analysis of radio scattering and space-probe observations of small-scale structure in the interplanetary medium // *Astrophys. J.* – 1970. – Vol. 161. – P. 755–763.
14. *Mahon R., Moore C. I., Burris H. R., Rabinovich W. S., Suite M. R., and Thomas L. M.* Power spectra of a free space optical link in a maritime environment // *Proc. SPIE,*

- Free-Space Laser Communications IX. – 2009. – Vol. 7464. – id. 746407, doi:10.1117/1282163.
15. Фалькович И. С., Коноваленко А. А., Калиниченко Н. Н., Оляк М. Р., Гридин А. А., Бубнов И. Н., Браженко А. И., Лекашо А., Рукер Х. О. Первые результаты дисперсионного анализа межпланетных мерцаний в декаметровом диапазоне длин волн // Радиофизика и радиоастрономия. – 2007. – Т. 12, № 4. – С. 350–356.
16. 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.

М. М. Калініченко<sup>1</sup>, О. О. Коноваленко<sup>1</sup>,  
А. І. Браженко<sup>2</sup>, В. В. Соловійов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Радіоастрономічний інститут НАН України,  
вул. Червонопрапорна, 4, м. Харків, 61002, Україна  
<sup>2</sup>Полтавська гравіметрична обсерваторія Інституту  
геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України,  
вул. М'ясоєдова, 27/29, м. Полтава, 36029, Україна

КОРОНАЛЬНИЙ ВИКИД МАСИ 15 ЛЮТОГО 2011 Р.  
В МІЖПЛАНЕТНОМУ ПРОСТОРИ  
ЗА СПОСТЕРЕЖЕННЯМИ МЕРЕХТІННЯ  
КОСМІЧНИХ ДЖЕРЕЛ В ДЕКАМЕТРОВОМУ  
ДІАПАЗОНІ РАДІОХВИЛЬ

Показано високу ефективність метода міжпланетного мерехтіння космічних радіоджерел в декаметровому діапазоні радіохвиль для виявлення корональних викидів маси за орбітою Землі. Встановлено, що на відстанях від Сонця

1÷1.7 а. о. корональний викид маси в міжпланетному просторі продовжує уповільнюватися, при цьому його швидкість поширення наближається до швидкості оточуючого незбуреного сонячного вітру, а кутовий розмір становить щонайменш 66°.

N. N. Kalinichenko<sup>1</sup>, A. A. Konovalenko<sup>1</sup>,  
A. I. Brazhenko<sup>2</sup>, and V. V. Solov'ev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Radio Astronomy, National Academy  
of Sciences of Ukraine,  
4, Chervonopraporna St., Kharkiv, 61002, Ukraine

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

2011 FEBRUARY 15 CME IN THE INTERPLANETARY  
MEDIUM BY OBSERVATIONS  
OF RADIO SOURCE SCINTILLATIONS  
AT THE DECAMETER WAVELENGTHS

The high efficiency of the interplanetary scintillation method at the decameter wavelengths for detection of coronal mass ejections beyond Earth's orbit is shown. It is established that coronal mass ejection in the interplanetary medium continues slowing at distances from 1 to 1.7 AU from the Sun, its velocity tending to that of the ambient solar wind, the angular size being no less than 66°.

Стаття поступила в редакцію 9.10.2013