

УДК 523.164.42

М. Р. ОЛЬЯК¹, Н. Н. КАЛИНИЧЕНКО¹,
А. А. КОНОВАЛЕНКО¹, А. И. БРАЖЕНКО²¹ Радиоастрономический институт НАН Украины,
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина
E-mail: marinaolyak@gmail.com, kalinich@rian.kharkov.ua² Полтавская гравиметрическая обсерватория Института геофизики
им. С. И. Субботина НАН Украины,
ул. Мясоедова, 27/29, г. Полтава, 36029, Украина

ПРИМЕНЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО И ДИСПЕРСИОННОГО АНАЛИЗА В ДЕКАМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ РАДИОВОЛН ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Описаны некоторые особенности применения спектральной и дисперсионной методик определения параметров солнечного ветра по данным наблюдений межпланетных мерцаний космических радиоисточников в декаметровом диапазоне радиоволн. Указаны характерные ошибки восстановления параметров солнечного ветра в зависимости от методики и модели солнечного ветра.

Ключевые слова: межпланетные мерцания, солнечный ветер, спектральная методика, дисперсионная методика

1. Введение

Для изучения параметров солнечного ветра и учета искажений, вносимых в радиоизлучение космических источников рассеянием в межпланетной среде, широко используется метод межпланетных мерцаний [1]. Измерения характеристик межпланетных мерцаний позволяют восстанавливать параметры солнечного ветра в направлении просвечивающего радиоисточника [2]. Обычно для этого используется вписывание в экспериментальные зависимости, например, во временные спектры мерцаний и зависимости скорости переноса дифракционной картины (дрейфовой скорости) от частоты гармоник пространственно-временного кросс-спектра мерцаний, функций, полученных в результате расчета с использованием определенной модели солнечного ветра [3–5]. Для декаметрового диапазона радиоволн, позволяющего эффективно изучать параметры солнечного ветра за орбитой Земли, первая методика была разработана в работе [4], вторая – в работе [6]. В случае наблюдений на одном радиотелескопе (однопунктовые эксперименты), как правило, анализируется временной спектр мерцаний (спектральная методика). При этом по одному спектру мерцаний радио-

источника с известным угловым размером удается восстановить несколько параметров солнечного ветра (в частности, скорость и показатель степени спектра неоднородностей). Это возможно благодаря тому, что перечисленные параметры по-разному влияют на форму временного спектра мерцаний. Скорость в основном определяет ширину спектра, а показатель степени спектра неоднородностей – наклон высокочастотной части. Наличие данных измерений из двух пунктов позволяет уточнить в этой задаче скорость и модель солнечного ветра на луче зрения путем анализа пространственно-временного кросс-спектра и получаемой из него дисперсионной зависимости дрейфовой скорости (дисперсионная методика) [6–8]. Поскольку представляет интерес получить картину распределения межпланетной плазмы с максимальным пространственным разрешением (т. е. с использованием максимального возможного числа просвечивающих радиоисточников), данные, измеренные в одном пункте, также имеют большую ценность.

Цель настоящей работы – описать преимущества и недостатки спектральной и дисперсионной методик анализа данных наблюдений межпланетных мерцаний, а также сравнить точности восстановления параметров солнечного ветра в первом (однопунктовые наблюдения) и во втором (двухпунктовые наблюдения) случаях, когда доступны для анализа как временные

спектры, так и дисперсионные зависимости дрейфовой скорости.

2. Наблюдения

Синхронные наблюдения межпланетных мерцаний [6] осуществлялись на радиотелескопах УТР-2 (Харьковская обл.) площадью 150000 м² и радиотелескопе УРАН-2 (Полтавская обл.) площадью 28000 м² [9, 10]. С целью решения поставленной задачи в декабре 2008 г. были проведены наблюдения радиоисточника 3С196 (квазар, поток мерцающей компоненты составляет 130 ± 25 Ян на частоте $f_0 = 25$ МГц [11]). Элонгация (угол между направлением на радиоисточник и направлением на Солнце) в период наблюдений была равна приблизительно 140°. Радиоисточник 3С196 наблюдался синхронно на радиотелескопах УТР-2 и УРАН-2 в интервале часовых углов ±1^h вблизи верхней кульминации сканами по 4 мин. Данные регистрировались широкополосными приемными устройствами с эффективной полосой приема 2.4 МГц (УТР-2) [12] и 11.8 МГц (УРАН-2) [13]. На рис. 1 показан пример синхронной записи межпланетных мерцаний, полученной 21 декабря 2008 г. Видна хорошая корреляция мерцаний на двух радиотелескопах и задержка во времени, связанная с разницей в пути распространения сигналов. Большая дисперсия интенсивности сигнала I в пункте УТР-2 связана с меньшей шириной эффективной полосы приема. Первичная

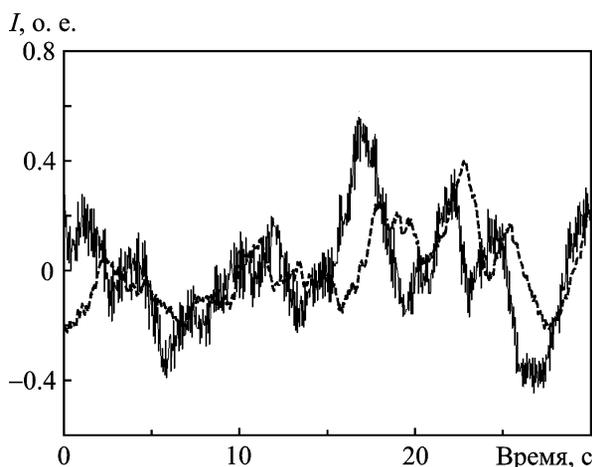


Рис. 1. Пример синхронной записи межпланетных мерцаний на радиотелескопе УТР-2 (сплошная линия) и УРАН-2 (пунктирная линия), полученной 21 декабря 2008 г.

обработка данных состояла в оценке временных спектров мерцаний $W(f)$ с использованием формулы

$$W(f) = |F(f)|^2 / T$$

(где $F(f)$ – преобразование Фурье процесса флуктуаций интенсивности радиоисточника $I(t)$, f – частота мерцаний, T – длительность реализации) и дисперсионной зависимости дрейфовой скорости $V(f)$ по формуле

$$V(f) = \frac{2\pi fb}{\Delta\psi(f)}$$

(где $\Delta\psi(f) = \Delta\psi_1(f) - \Delta\psi_2(f)$ – сдвиг фаз между пунктами наблюдений, определяемый из пространственного кросс – спектра мерцаний, b – расстояние между приемными антеннами). Оценка производилась по 30-секундным реализациям, предварительно очищенным от помех.

3. Анализ данных с помощью спектральной и дисперсионной методик

Для определения скорости солнечного ветра было проведено сопоставление экспериментальных спектров мерцаний $W(f)$ и дисперсионных зависимостей дрейфовой скорости $V(f)$ с расчетными. Предполагалось, что луч зрения (ось z) пересекает N потоков солнечного ветра шириной d_n , направленных радиально от Солнца. Протяженность области, занимаемой на луче зрения n -м потоком, равна l_n , $n = 1, \dots, N$. С использованием метода фейнмановских интегралов по траекториям (более подробно см. [14, 15]) были получены выражения для временного спектра мерцаний $W(f)$, кросс-спектра $W(b, f)$ и дисперсионной зависимости дрейфовой скорости $V(f)$:

$$W(f) = \sum_{n=1}^N W_n(v_n, f),$$

$$W_n(v_n, f) \approx 2\pi l_n \left(\frac{4\pi^2 r_e}{k} \right)^2 \int_0^1 P_n(v_n, \zeta, f) d\zeta;$$

$$W(b, f) = \sum_{n=1}^N W_n(b, v_n, f),$$

$$W_n(b, v_n, f) \approx 2\pi l_n \left(\frac{4\pi^2 r_e}{k} \right)^2 \times \int_0^1 P_n(v_n, \zeta, f) \exp\left(\frac{2\pi i f b}{v_{n\perp}(\zeta)} \right) d\zeta;$$

$$V(f) = \frac{2\pi f b}{\arccos \frac{\operatorname{Re} W(b, f)}{W(b, f)} \sin \varphi}.$$

Здесь $P_n(v_n, \zeta, f) = \int_{2\pi f/v_{n\perp}}^{\infty} \sin^2 \left(\frac{\kappa_{n\perp}^2 l_n \zeta}{2k} \right) \times \frac{\kappa_{n\perp} \Phi_n(\kappa_{n\perp}, 0, \zeta)}{\sqrt{\zeta(\kappa_{n\perp}^2 v_{n\perp}^2(\zeta) - 4\pi^2 f^2)}} \exp\left(-\frac{1}{2} \kappa_{n\perp}^2 L^2 \zeta^2 \theta_0^2 \right) d\kappa_{n\perp},$
 $L = \sum_{n=1}^N l_n,$ $\Phi_n(\kappa_{n\perp}, 0, \zeta)$ – трехмерный пространственный спектр флуктуаций электронной концентрации, $\kappa_{n\perp}$ – перпендикулярная компонента волнового вектора, $\zeta = (1 - z/l_n)$; $k = 2\pi f_0/c,$ f_0 – частота радиоизлучения источника, c – скорость света; r_e – радиус электрона; $v_{n\perp}(\zeta) = v_n \sin \varphi / r_n(\zeta),$ $r_n(\zeta)$ – длина радиус-вектора точки на луче зрения, выраженная в астрономических единицах, φ – угол элонгации; b – расстояние между пунктами наблюдений (база); θ_0 – угловой размер радиоисточника. Величины $W_n(v_n, f)$ и $W_n(b, v_n, f)$ обусловлены рассеянием на неоднородностях n -го потока.

На рис. 2 и 3 представлены экспериментальные спектры мерцаний и экспериментальные дисперсионные зависимости дрейфовой скорости (кривые 1). Высоочастотные особенности, которые видны у экспериментальных зависимостей, находятся в пределах ошибок оценки и являются результатом недостаточного количества реализаций процесса мерцаний при усреднении (за 2 ч наблюдений в среднем удается получать до полутора – двух десятков реализаций, свободных от помех). Однако наличие таких флуктуаций не мешает изучать общую форму указанных зависимостей. На графиках представлены также расчетные спектры мерцаний и расчетные дисперсионные зависимости, которые показали наименьшие среднеквадратические ошибки при сопоставлении с экспериментальными спектрами и дисперсионными кривыми.

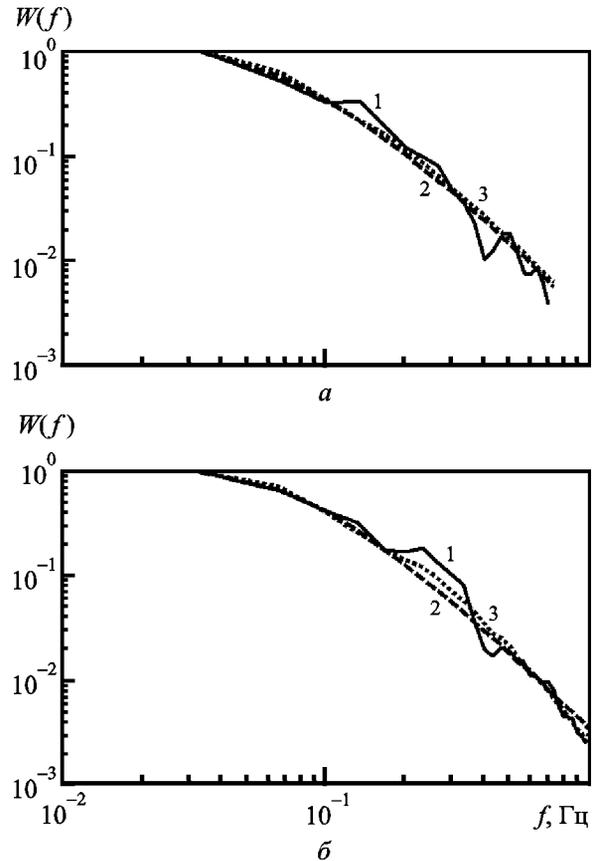


Рис. 2. Спектры мерцаний радиоисточника 3C196: *a* – данные наблюдений 21 декабря 2008 г. (кривая 1) и результаты расчетов для односкоростной модели солнечного ветра с параметрами $v_1 = 300$ км/с, $p_1 = 3.1$ (кривая 2) и для двухпоточковой модели с параметрами $v_1 = 260$ км/с, $p_1 = 3.2,$ $d_1 = 0.8$ а. е., $v_2 = 230$ км/с, $p_2 = 3.2,$ $d_2 = 1.0$ а. е. (кривая 3); *б* – данные наблюдений 23 декабря 2008 г. (кривая 1) и результаты расчетов для односкоростной модели солнечного ветра с параметрами $v_1 = 310$ км/с, $p_1 = 3.2$ (кривая 2) и для двухпоточковой модели с параметрами $v_1 = 350$ км/с, $p_1 = 3.8,$ $d_1 = 0.6$ а. е., $v_2 = 280$ км/с, $p_2 = 3.8,$ $d_2 = 1.0$ а. е. (кривая 3)

Определение параметров солнечного ветра осуществлялось путем совмещения экспериментальных спектров мерцаний и экспериментальных дисперсионных зависимостей дрейфовой скорости с расчетными. Сопоставление проводилось отдельно для односкоростной ($N = 1$) и потоковой (два или три потока, $N = 2, 3$) моделей с использованием метода наименьших квадратов. Полученные из сопоставления экспериментальных и расчетных спектров мерцаний значения скорости $v_{1,2},$ показателя трехмерного

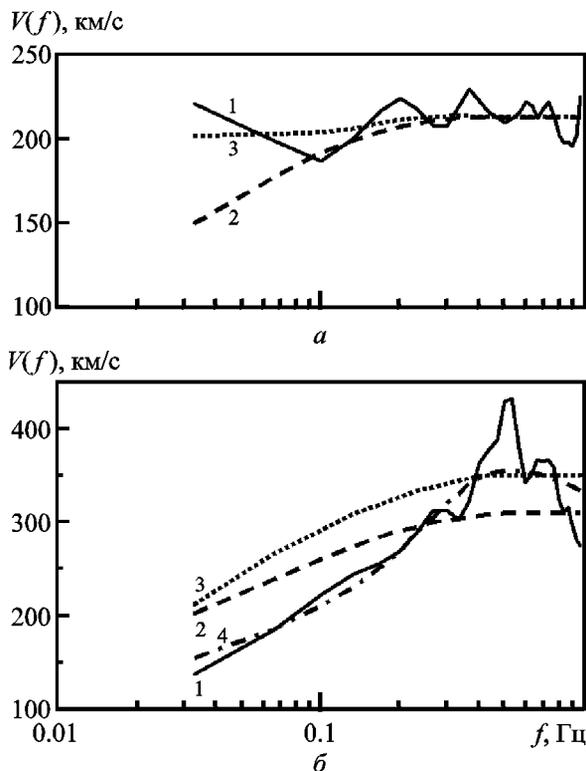


Рис. 3. Дисперсионные зависимости дрейфовой скорости в направлении радиисточника 3С196:

а – данные наблюдений 21 декабря 2008 г. (кривая 1) и результаты расчетов для односкоростной модели солнечного ветра с параметром $v_1 = 220$ км/с (кривая 2) и для трехпоточковой модели с параметрами $v_1 = 220$ км/с, $d_1 = 0.1$ а. е., $v_2 = 280$ км/с, $d_2 = 0.5$ а. е., $v_3 = 250$ км/с, $d_3 = 1.0$ а. е. (кривая 3);

б – данные наблюдений 23 декабря 2008 г. (кривая 1) и результаты расчетов для односкоростной модели солнечного ветра с параметром $v_1 = 310$ км/с (кривая 2), для двухпоточковой модели с параметрами $v_1 = 350$ км/с, $d_1 = 0.6$ а. е., $v_2 = 280$ км/с, $d_2 = 1.0$ а. е. (кривая 3) и двухпоточковой модели с $v_1 = 310$ км/с, $d_1 = 0.5$ а. е., $v_2 = 270$ км/с, $d_2 = 1.0$ а. е. и флуктуациями скорости в первом потоке $\sigma_1 = 0.6v_1$ (кривая 4)

пространственного спектра флуктуаций электронной концентрации $p_{1,2}$ и ширины потоков солнечного ветра $d_{1,2}$ использовались в качестве начальных значений при итерационных расчетах дисперсионных зависимостей дрейфовой скорости. Для наблюдений 21 декабря 2008 г. наилучшее согласие между экспериментальными и расчетными спектрами мерцаний (рис. 2, *а*) было получено при значениях $v_1 = (300 \pm 30)$ км/с, $p_1 = 3.1 \pm 0.1$ для односкоростной модели и $v_1 = (260 \pm 50)$ км/с, $p_1 = 3.2 \pm 0.2$, $d_1 =$

(0.8 ± 0.3) а. е., $v_2 = (230 \pm 50)$ км/с, $p_2 = 3.2 \pm 0.4$, $d_2 = (1.0 \pm 0.5)$ а. е. для двухпоточковой модели. Для наблюдений 23 декабря 2008 г. наилучшее согласие между экспериментальными и расчетными спектрами мерцаний (рис. 2, *б*) было получено при значениях $v_1 = (310 \pm 40)$ км/с, $p_1 = 3.2 \pm 0.2$ для односкоростной модели и $v_1 = (350 \pm 40)$ км/с, $p_1 = 3.8 \pm 0.2$, $d_1 = (0.6 \pm 0.2)$ а. е., $v_2 = (280 \pm 50)$ км/с, $p_2 = 3.8 \pm 0.3$, $d_2 = (1.0 \pm 0.5)$ а. е. для двухпоточковой модели. Относительная среднеквадратическая ошибка в первом случае составила 16 % для односкоростной модели и 19 % для двухпоточковой модели. Во втором случае среднеквадратическая ошибка составила соответственно 23 % для односкоростной модели и 17 % для двухпоточковой модели. Для наблюдений 21 декабря 2008 г. наилучшее соответствие экспериментальных дисперсионных зависимостей $V(f)$ расчетным (рис. 3, *а*) было получено для трехпоточковой модели (кривая 3) при значениях $v_1 = (220 \pm 10)$ км/с, $d_1 = (0.1 \pm 0.05)$ а. е., $v_2 = (280 \pm 20)$ км/с, $d_2 = (0.5 \pm 0.2)$ а. е., $v_3 = (250 \pm 20)$ км/с, $d_3 = (1.0 \pm 0.5)$ а. е. Среднеквадратическая ошибка составила 9 % для односкоростной модели со значением $v_1 = (220 \pm 10)$ км/с и 5 % для трехпоточковой модели (кривые 2 и 3 соответственно на рис. 3, *а*). Следует отметить, что в декаметровом диапазоне наибольший вклад в наблюдаемые мерцания вносят области межпланетной среды, находящиеся на расстоянии от 0.5 а. е. до приблизительно $1 \div 1.5$ а. е. [16]. В то же время, как показывают модельные расчеты, на дисперсионные кривые дрейфовой скорости могут оказывать влияние области межпланетной среды, расположенные как на расстояниях, меньших 0.1 а. е., так и на расстояниях, больших 2 а. е. Этим обусловлена необходимость более сложной трехпоточковой модели для интерпретации наблюдений 21 декабря 2008 г. Для наблюдений 23 декабря 2008 г. наилучшее согласие между экспериментальными и расчетными зависимостями $V(f)$ (рис. 3, *б*) было получено при значениях $v_1 = (310 \pm 20)$ км/с, $d_1 = (0.5 \pm 0.1)$ а. е., $v_2 = (270 \pm_{20}^{30})$ км/с, $d_2 = (1.0 \pm_{0.5}^{1.0})$ а. е. и флуктуациями скорости в первом потоке со стандартным отклонением $\sigma_1 = (0.6 \pm 0.2)v_1$ при относительной среднеквад-

ратической ошибке 10 % (кривая 4). Кривые 2 и 3 на рис. 3, б представляют дисперсионные зависимости для односкоростной и двухпоточковой моделей, которые показали наименьшие среднеквадратические ошибки при сопоставлении с экспериментальными спектрами. Среднеквадратическая ошибка при сопоставлении кривых 2 и 3 с экспериментальными данными составляла соответственно 17 и 20 % (см. также [15]).

4. Выводы

Как видно из полученных результатов, использование анализа дисперсионных зависимостей дрейфовой скорости позволяет уточнить значения скорости и ширины потоков солнечного ветра, полученные из наблюдений спектров мерцаний. Среднеквадратические ошибки при использовании метода дисперсионного анализа дрейфовой скорости несколько ниже, чем в спектральном методе. Вместе с тем, как показали расчеты, наклон дисперсионной кривой слабо зависит от показателя степени пространственного спектра флуктуаций электронной концентрации в плазме солнечного ветра. В связи с этим метод дисперсионного анализа эффективен при изучении тонкой структуры скорости солнечного ветра, но для комплексного исследования межпланетной среды анализ спектров мерцаний остается неизменно важным.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hewish A., Scott P. F., and Wills D. Interplanetary Scintillation of Small Diameter Radio Sources // *Nature*. – 1964. – Vol. 203, Is. 4951. – P. 1214–1217.
2. Hewish A., Dennison P. A., and Pilkington J. D. H. Measurements of the size and motion of the irregularities in the interplanetary medium // *Nature*. – 1966. – Vol. 209, Is. 5029. – P. 1188–1189.
3. Шишов В. И., Шишова Т. Д. Влияние размеров источника на спектры межпланетных мерцаний. Наблюдения // *Астрономический журнал*. – 1979. – Т. 56, № 3. – С. 613–622.
4. Бовкун В. П., Жук И. Н. Спектры мерцаний на неоднородностях ионосферы и межпланетной плазмы и возможность их разделения в декаметровом диапазоне радиоволн // *Доклады АН УССР*. – 1981. – Сер. А, № 6. – С. 69–71.
5. Manoharan P. K. and Ananthkrishnan S. Determination of solar-wind velocities using single-station measurements of interplanetary scintillations // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 1990. – Vol. 244. – P. 691–695.
6. Фалькович И. С., Коноваленко А. А., Калиниченко Н. Н., Оляк М. Р., Гридин А. И., 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.
7. Breen A. R., Coles W. A., and Grall R. R., Klinglesmith M. T., Markkanen J., Moran P. I., Tegid B., and Williams P. J. S. EISCAT measurements of the solar wind // *Ann. Geophysicae*. – 1996. – Vol. 14. – P. 1235–1245.
8. Калиниченко Н. Н., Фалькович И. С., Коноваленко А. А., Браженко А. И. Разделение межпланетных и ионосферных мерцаний космических источников в декаметровом диапазоне радиоволн // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2013. – Т. 18, № 3. – С. 210–219.
9. Брауде С. Я., Мень А. В., Содин Л. Г. Радиотелескоп декаметрового диапазона волн УТР-2 // *Антенны*. – М.: Связь. – 1978. – Вып. 26. – С. 3–14.
10. Мень А. В., Шарыкин Н. К., Захаренко В. В., Булацен В. Г., Браженко А. И., Ващишин Р. В. Радиотелескоп декаметрового диапазона волн УРАН-2 // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2003. – Т. 8, № 4. – С. 345–356.
11. Бовкун В. П., Жук И. Н. Мерцания космических источников в декаметровом диапазоне радиоволн на неоднородностях межпланетной плазмы и ионосферы // *Космическая наука и техника*. – 1992. – № 7. – С. 80–91.
12. 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.
13. 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.
14. Olyak M. R. Large-scale structure of solar wind and geomagnetic phenomena // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* – 2012. – Vol. 86. – P. 34–40.
15. Olyak M. R. The dispersion analysis of drift velocity in the study of solar wind flows // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* – 2013. – Vol. 102. – P. 185–191.
16. Калиниченко Н. Н., Коноваленко А. А., Браженко А. И., Соловьев В. В. Корональный выброс массы 15 февраля 2011 г. в межпланетном пространстве и его наблюдения методом мерцаний космических источников в декаметровом диапазоне радиоволн // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2013. – Т. 18, № 4. – С. 301–308.

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

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

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

ЗАСТОСУВАННЯ СПЕКТРАЛЬНОГО
ТА ДИСПЕРСІЙНОГО АНАЛІЗУ
В ДЕКАМЕТРОВОМУ ДІАПАЗОНІ
РАДІОХВИЛЬ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ
СОНЯЧНОГО ВІТРУ

Описано деякі особливості застосування спектральної та дисперсійної методик визначення параметрів сонячного вітру за даними спостережень міжпланетних мерехтінг космічних радіоджерел в декаметровому діапазоні радіохвиль. Зазначено характерні похибки визначення параметрів сонячного вітру залежно від методики і моделі сонячного вітру.

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

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

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

APPLICATION OF SPECTRAL AND DISPERSION
TECHNIQUES AT THE DECAMETER
WAVELENGTHS FOR DETERMINATION
OF SOLAR WIND PARAMETERS

Some features of application of spectral and dispersion techniques for determination of solar wind parameters from the interplanetary scintillations data of cosmic radio sources at the decameter wavelengths are described. The characteristic errors of solar wind parameters determination depending on the technique and solar wind model are presented.

Стаття постуила в редакцію 21.05.2014