

М. М. КАЛІНІЧЕНКО¹, М. Р. ОЛЬЯК¹, О. О. КОНОВАЛЕНКО¹,
І. М. БУБНОВ¹, С. М. ЄРІН¹, А. І. БРАЖЕНКО²,
О. Л. ІВАНТИШИН³, О. О. ЛИТВИНЕНКО¹

¹ Радиоастрономічний інститут НАН України,
вул. Мистецтв, 4, м. Харків, 61002, Україна
E-mail: kalinich@ri.kharkov.ua

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

³ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України,
вул. Наукова, 5, м. Львів, 79060, Україна

До 100-річчя І. С. Шкловського

ДОСЛІДЖЕННЯ СОНЯЧНОГО ВІТРУ ШЛЯХОМ СПОСТЕРЕЖЕНЬ МІЖПЛАНЕТНИХ МЕРЕХТІНЬ КОСМІЧНИХ РАДІОДЖЕРЕЛ У ДЕКАМЕТРОВОМУ ДІАПАЗОНІ РАДІОХВИЛЬ

Предмет і мета роботи: *опис методики досліджень сонячного вітру, що базується на спостереженнях мерехтінь декаметрового радіовипромінювання космічних радіоджерел.*

Методи і методологія: *Методика ґрунтується на використанні методу фейнманівських інтегралів за траєкторіями для розрахунку статистичних характеристик міжпланетних мерехтінь.*

Результати: *Створено методику визначення потокової структури сонячного вітру за орбітою Землі. Методика ґрунтується на аналізі часових, частотних та просторових характеристик міжпланетних мерехтінь декаметрового радіовипромінювання космічних радіоджерел. Виявлення потокової структури відкриває унікальні можливості для досліджень фізики міжпланетної плазми. Зокрема, різниця в параметрах потоків міжпланетної плазми може бути використана для досліджень високошвидкісних потоків сонячного вітру з корональних дір, виявлення і вивчення динаміки руху корональних викидів маси в міжпланетному просторі. Останнє дозволить, наприклад, розробити надійну методику оцінки часу приходу корональних викидів маси до Землі, що становить безумовний інтерес з точки зору прогнозу космічної погоди.*

Висновок: *Показано, що сучасний прогрес в цифровій техніці та методиках аналізу даних дозволяє ефективно використовувати спостереження міжпланетних мерехтінь радіовипромінювання космічних радіоджерел для визначення параметрів сонячного вітру, реконструкції потокової структури сонячного вітру, виявлення та дослідження динаміки корональних викидів маси за орбітою Землі.*

Ключові слова: *сонячний вітер, міжпланетне мерехтіння, декаметровий діапазон*

1. Вступ

Сонячний вітер – це потік іонізованих часток (в основному воднево-гелієвої плазми), що витікає з сонячної корони із швидкістю 300 ÷ 2000 км/с в навколишній космічний простір і заповнює гігантський об'єм радіусом близько 100 а. о., який прийнято називати геліосферою. Безліч природних явищ пов'язано з сонячним вітром, у тому числі магнітні бурі, полярні саява і різна форма кометних хвостів, завжди спрямованих від Сонця. Фактично наша планетна система занурена в зовнішню корону

Сонця. І. Шкловський нарівні з М. Шварцшильдом, С. Баумбахом, Ю. Паркером та іншими є основоположником сучасної теорії сонячної корони. Його монографії “Сонячна корона” [1] та “Фізика сонячної корони” [2] зробили значний внесок у розуміння фізичних процесів, що мають місце в цій області.

Одним з найефективніших методів досліджень сонячного вітру є метод міжпланетних мерехтінь. Ефект міжпланетних мерехтінь радіоджерел уперше був виявлений у 1964 р. англійським радіоастрономом Ентоні Хьюїшем (Hewish) [3, 4]. Суть методу міжпланетних мерехтінь полягає в тому, що випромінювання компактних радіоджерел, проходячи через міжпланетне середовище з неоднорідностями сонячного вітру, зазнає дифракції, внас-

лідок чого в площині спостереження утворюються просторові флуктуації його інтенсивності. Через рух міжпланетної плазми із швидкістю сонячного вітру просторові флуктуації в точці прийому на Землі реєструються як часові варіації потоку випромінювання спостережуваного радіоджерела.

Характеристики мерехтінь компактних радіоджерел, зокрема індекс і спектр мерехтінь, визначаються параметрами неоднорідностей сонячного вітру (щільністю, швидкістю і спектром), тому вивчення характеристик мерехтінь дозволяє ефективно встановлювати вказані параметри міжпланетної плазми, у тому числі на високих геліоширотах, важкодоступних для досліджень з космічних апаратів. Специфіка спостережень міжпланетних мерехтінь космічних радіоджерел визначає високу ефективність декаметрового діапазону для вивчення сонячного вітру на елонгаціях $90^\circ \div 180^\circ$ [5].

2. Теорія

У роботах [6, 7] обґрунтовано можливість застосування методу фейнманівських інтегралів за траєкторіями для інтерпретації спостережень мерехтінь космічних радіоджерел на неоднорідностях міжпланетної плазми у декаметровому діапазоні при великих кутах елонгації і отримано вираз для енергетичного спектру мерехтінь:

$$W(f) \approx 2\pi^2 I_0^2 \frac{l\omega_p^4}{(c\omega)^2} \times \int_0^1 d\zeta \int_a^\infty \kappa_\perp d\kappa_\perp \left[1 - \cos(\kappa_\perp l \zeta c / \omega) \right] \times \exp \left[-\frac{1}{2} (\kappa_\perp l \zeta \theta)^2 \right] \frac{\Phi_N(\kappa_\perp, 0, \zeta)}{\left[\zeta (\kappa_\perp^2 V_\perp^2 - 4\pi^2 f^2) \right]^{1/2}}, \quad (1)$$

де просторовий спектр неоднорідностей електронної концентрації $\Phi_N(\kappa_\perp, 0, \zeta)$ береться ступеневим та ізотропним [8],

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

Тут I_0 – інтенсивність джерела з гаусовим розподілом інтенсивності радіовипромінювання; l – товщина області розсіювання; ω_p – плазмова частота;

c – швидкість світла; $\omega = 2\pi\nu$, ν – частота радіовипромінювання; $\zeta = 1 - z/l$, z – відстань до розсіюючого шару; $\kappa_\perp = |\vec{\kappa}_\perp|$, $\vec{\kappa}_\perp = \{\kappa_x, \kappa_y\}$ – просторовий хвильовий вектор; θ – кутовий розмір джерела з гаусовим розподілом інтенсивності радіовипромінювання; $a = 2\pi f / V_\perp$, $V_\perp \equiv V_\perp(\zeta) = V \sin \varepsilon / (R(\zeta) / R_0)$, $R_0 = 1$ а. о.; $\sigma_N^2(\zeta)$ – дисперсія відносних флуктуацій електронної концентрації $\delta N^2 / \langle N \rangle^2$; L_0 , l_0 – зовнішній і внутрішній масштаби турбулентності; n – показник ступеня просторового спектру неоднорідностей електронної концентрації.

Крос-спектр мерехтінь у спостереженнях в двох рознесених у просторі точках описується виразом:

$$W(r, f) \approx 2\pi^2 I_0^2 \frac{l\omega_p^4}{(c\omega)^2} \times \int_0^1 d\zeta \int_a^\infty \kappa_\perp d\kappa_\perp \left[1 - \cos(\kappa_\perp l \zeta c / \omega) \right] \times \exp \left[-\frac{1}{2} (\kappa_\perp l \zeta \theta)^2 + i \frac{2\pi f r}{V_\perp(\zeta)} \right] \frac{\Phi_N(\kappa_\perp, 0, \zeta)}{\left[\zeta (\kappa_\perp^2 V_\perp^2 - 4\pi^2 f^2) \right]^{1/2}}, \quad (2)$$

де r – відстань між приймальними антенами (база інтерферометра).

Оцінивши крос-спектр (2), можливо отримати дисперсійну залежність фазової швидкості мерехтінь:

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

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

Наведені вище формули більш адекватно описують явище міжпланетного мерехтіння декаметрового радіовипромінювання, ніж вирази, які можна отримати на основі методу фазового екрану [9], що зазвичай застосовується при інтерпретації височастотних даних. Адекватність, серед іншого, проявляється в кращому збігові значень параметрів сонячного вітру, отриманих за формулами (1)–(3), та вимірних космічними апаратами.

3. Спостереження

Зазвичай спостереження виконуються на радіотелескопі УТР-2 [10] та синхронно на декількох радіотелескопах системи УРАН (УРАН-2,3,4) [11]. Полоса робочих частот радіотелескопів $8 \div 32$ МГц. У якості радіоджерел вибираються потужні (десятки та більше янських) компактні ($\theta < 5''$) джерела декаметрового радіовипромінювання: 3С144 (пульсар), 3С196 та 3С273 (квасари) та інші. Радіоджерела спостерігаються в інтервалі часових кутів $\pm 1^h$ поблизу верхньої кульмінації сканами тривалістю 4 хв. Дані в пунктах реєструються спектральними аналізаторами DSP-z [12]. На входи спектральних аналізаторів подається сума і різниця сигналів антен “Північ – Південь” та “Захід – Схід” у випадку вимірювань на радіотелескопі УТР-2 та сума і різниця сигналів однієї поляризації від двох половинок антени – у випадку спостережень на радіотелескопах УРАН-2, 3, 4. Запис даних виконується в режимі повної потужності з наступними параметрами аналізу: смуга частот $20.63 \div 28.88$ МГц, стала усереднення індивідуальних спектрів $t_{av} = 20$ мс. Режим повної потужності – це один з режимів роботи спектральних аналізаторів DSP-z, за яким вхідні сигнали (у нашому випадку суми та різниці) $x_{\pm}(\tau)$ перетворюються у двовимірні спектрограми $u_{\pm}(t, \nu)$ або динамічні спектри шляхом перетворення Фур’є:

$$u_{\pm}(t, \nu) = |X_{\pm}(t, \nu)|^2,$$

$$X_{\pm}(t, \nu) = \frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} x_{\pm}(\tau) g(\tau-t) e^{-i2\pi\nu\tau} d\tau,$$

де t – положення його центру; $g(t-\tau)$ – вікно; T – тривалість вікна вздовж вісі,

$$T = N_w \Delta t_s,$$

N_w – розмір вікна, $\Delta t_s = 1/f_s$, f_s – частота дискретизації даних.

У нашому випадку $N_w = 2^{14} = 16384$, $f_s = 66$ МГц, і ми маємо 2048 частотних канали, що відстоять на $\Delta\nu = f_s/N_w \approx 4$ кГц один від одного.

На рис. 1, *a-v* наведено приклади спостережень радіоджерел на різних елонгаціях. На рис. 1, *a* – міжпланетні мерехтіння радіоджерела 4С21.53 на елонгації 40° . На рис. 1, *б* наведено приклад реєстрації міжпланетних мерехтінь на

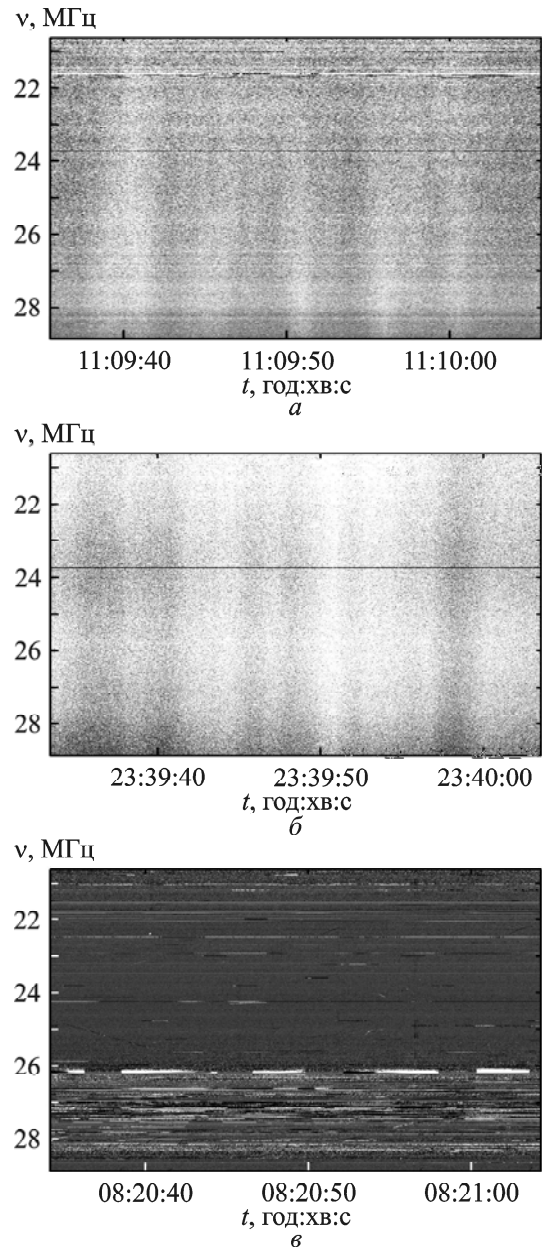


Рис. 1. Динамічні спектри міжпланетних мерехтінь: *a* – на малій елонгації (40°), *б* – на великій елонгації (170°), *в* – відсутність міжпланетних мерехтінь на елонгації 8°

великих елонгаціях (170°). Рис. 1, *в* ілюструє відсутність міжпланетних мерехтінь на крайній малій елонгації (8°).

Видно, що в полосі частот $20 \div 28$ МГц міжпланетні мерехтіння добре скорельовані як на великих (рис. 1, *б*), так і на малих (рис. 1, *a*) елонгаціях. Відсутність мерехтінь на крайній малій елонгації (рис. 1, *в*) зумовлена реалізацією режиму насичення.

4. Методика обробки даних

На першому етапі обробка даних полягає у видавленні частотних каналів, уражених перешкодами, і в усередненні інтенсивності сигналу в решті каналів для отримання максимально можливої чутливості. При цьому використовується властивість широкосмуговості процесу міжпланетних мерехтінь. Подальша обробка експериментальних даних полягає в оцінці енергетичного спектру $W(f)$ за формулою [13]

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

де $F(f)$ – перетворення Фур’є процесу флуктуацій інтенсивності випромінювання радіоджерела $I(t)$, f – частота мерехтінь, T – тривалість реалізації. Зазвичай вибираються реалізації в центрі сканів тривалістю $T = 20 \div 30$ с.

Індекс мерехтінь розраховується за формулою

$$m = \frac{\sigma_s}{I(t)} = \frac{\sqrt{\sigma_{(s+n)}^2 - \sigma_n^2}}{I(t)},$$

де $\overline{I(t)}$ – середня інтенсивність джерела; σ_s^2 , σ_n^2 , $\sigma_{(s+n)}^2$ – дисперсії процесів мерехтінь, шуму та їх суми. Дисперсії $\sigma_{(s+n)}^2$ та σ_n^2 визначаються з енергетичних спектрів шляхом інтегрування відповідних частин спектру:

$$\sigma_{(s+n)}^2 = \int W_{(s+n)}(f) df,$$

$$\sigma_n^2 = \int W_n(f) df,$$

де $W_{(s+n)}$ – енергетичний спектр мерехтінь, W_n – область енергетичного спектру мерехтінь $W_{(s+n)}$, зумовлена шумом. Крос-кореляційна функція мерехтінь, зареєстрованих на двох радіотелескопах, $R(\tau)$ оцінюється згідно виразу

$$R(\tau) = \int I_1(t) I_2(t + \tau) dt.$$

Параметри сонячного вітру визначаються шляхом суміщення теоретичних (1), (3) і експериментальних залежностей (model fitting procedure). Для розрахунків теоретичних залежностей нарівні з простою моделлю сферично симетричного сонячного вітру з середньою швидкістю V , показником тривимірного спектру флуктуацій густини електронів n та дисперсією флуктуацій густини

електронів $\sigma_N(\zeta)$, яка зменшується з відстанню від Сонця як $\sigma_N(\zeta) \propto (R(\zeta))^{-b}$, $b \approx 2$, використовується складніша багатопотокова модель [14]. У цьому випадку вважається, що промінь зору послідовно перетинає декілька потоків сонячного вітру. Наприклад, у трьохпотоковій моделі промінь зору перетинає послідовно три потоки з шириною l_1 , l_2 , l_3 з параметрами відповідно V_1 , n_1 , b_1 , $\sigma_{N1}(\zeta)$; V_2 , n_2 , b_2 , $\sigma_{N2}(\zeta)$ та V_3 , n_3 , b_3 , $\sigma_{N3}(\zeta)$. Зазвичай припускається, що $\sigma_{N1}(R_0)V_1 \approx \sigma_{N2}(R_0)V_2$, $\sigma_{N2}(R_0)V_2 \approx \sigma_{N3}(R_0)V_3$, що не суперечить відомим із спостережень значенням параметрів повільного і швидкого сонячного вітру (див., наприклад, [15]) і дозволяє спрощувати задачу. Енергетичний спектр слабких мерехтінь у цьому випадку можливо подати у вигляді суми $W_\Sigma(f) = \sum_{m=1}^3 W_m(f, v_m, n_m, b_m)$, де $W_m(f, v_1, n_1, b_1)$, $W_m(f, v_2, n_2, b_2)$ та $W_m(f, v_3, n_3, b_3)$ визначаються із виразу (1). Присутність на промені зору потоків, які суттєво відрізняються за потужністю ($\sigma_{Ni}(R_0)V_i \neq \sigma_{Nj}(R_0)V_j$, де $i, j = 1, 2, 3$), призводить до незначного викривлення параметрів потоку з більшою потужністю. У цьому випадку можливе застосування одношвидкісної моделі.

5. Результати

На рис. 2 надається приклад вписування теоретичного спектру (рис. 2, а) та дисперсійної залежності фазової швидкості міжпланетних мерехтінь (рис. 2, б) в експериментальні дані. На рис. 3 показано реконструкцію потокової структури сонячного вітру за результатами застосування процедури “model fitting” (рис. 2.) Видно, що в даному випадку на промені зору на радіоджерело (квazar 3C196) присутні три потоки сонячного вітру з різними параметрами (перший потік: $V_1 = 550$ км/с, $n_1 = 3.8$, $l_1 = 1$ а. о.; другий потік: $V_2 = 700$ км/с, $n_2 = 3.7$, $l_2 = 2$ а. о.; третій потік: $V_3 = 500$ км/с, $n_3 = 3.9$). Наявність достатнього обсягу даних для параметрів потоків сонячного вітру дозволяє виконати їх статистичний аналіз. На рис. 4 показано побудовані за даними спостережень міжпланетних мерехтінь у 2003–2011 рр. гістограми швидкості (рис. 4, а) та показника трьохвимірного просторового спектра флуктуацій (рис. 4, б) для повільних потоків сонячного вітру. Гістограми на рис. 5, а і б

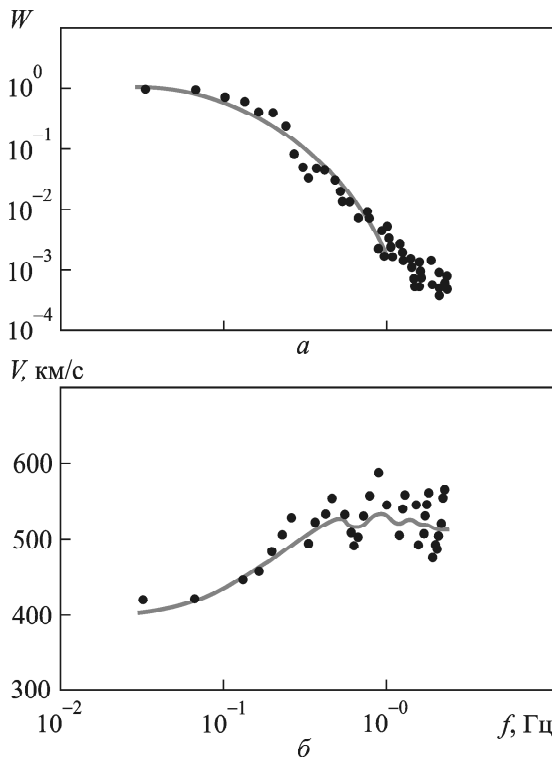


Рис. 2. Приклад вписування в експериментальні дані (точки) теоретичного спектру (а) та теоретичної дисперсійної залежності (б) фазової швидкості мерехтінь (суцільні лінії)

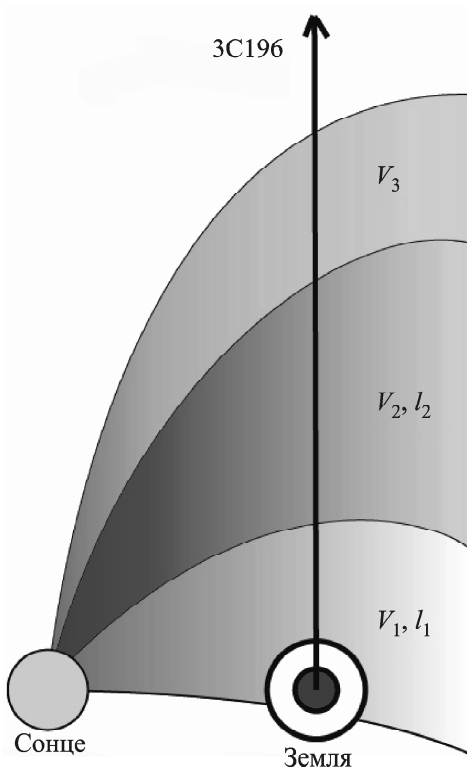


Рис. 3. Приклад реконструкції потокової структури сонячного вітру на промені зору на радіоджерело

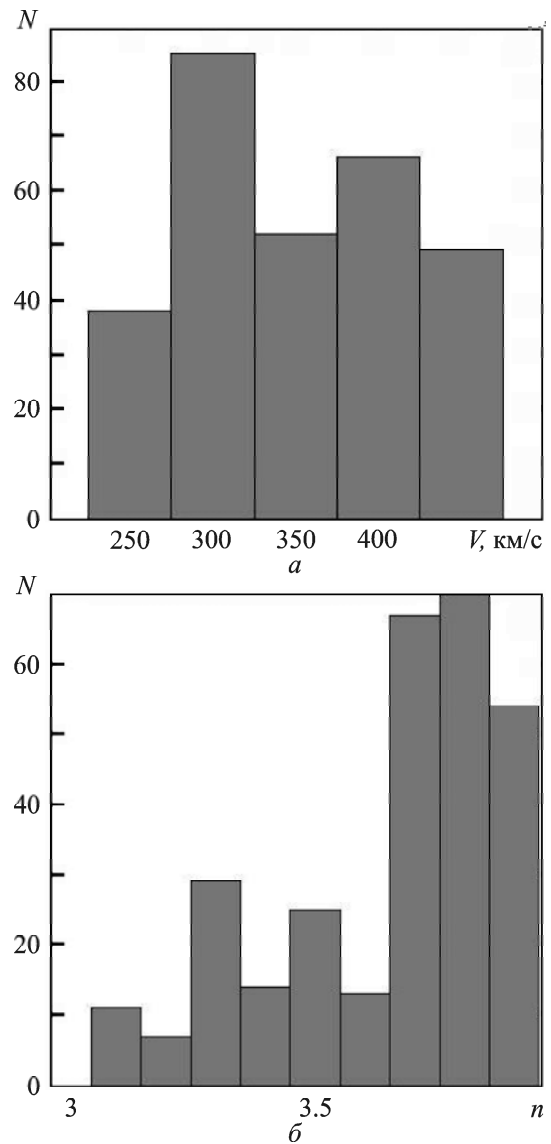


Рис. 4. Гістограми швидкості (а) та показника трьохвимірного просторового спектра флуктуацій (б) для повільних потоків сонячного вітру

ілюструють ті ж характеристики для швидких потоків сонячного вітру. Показані гістограми дозволяють визначити найбільш імовірні значення цих параметрів: $V = (350 \pm 20)$ км/с, $n = 3.7 \pm 0.05$ для повільних та $V = (590 \pm 30)$ км/с, $n = 3.5 \pm 0.1$ для швидких потоків.

6. Висновки

Створено комплексну ефективну методику досліджень сонячного вітру, що включає спостереження, зіставлення експериментальних даних та теоретичних розрахунків, моделювання. Методика

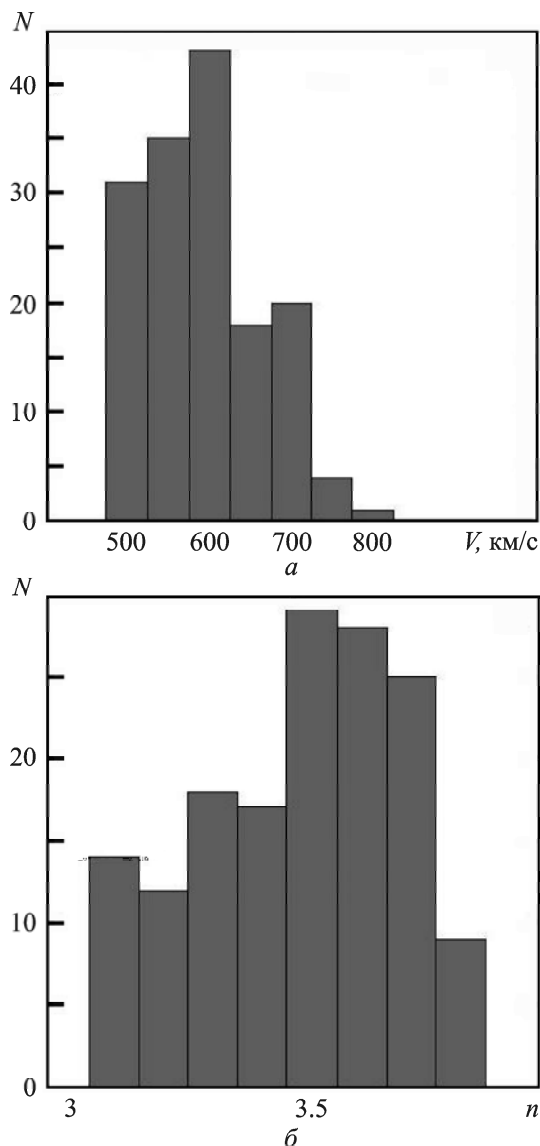


Рис. 5. Гістограми швидкості (а) та показника трьохвимірного просторового спектра флуктуацій (б) для швидких потоків сонячного вітру

дозволяє ефективно визначати параметри міжпланетної плазми, досліджувати їх статистику та реконструювати потокову структуру сонячного вітру. Статистичні дані становлять інтерес, наприклад, для виявлення кореляції між процесами на Сонці, у міжпланетному просторі, магнітосфері та іоносфері Землі. Різниця в параметрах потоків міжпланетної плазми може бути використана у дослідженнях високошвидкісних потоків сонячного вітру з корональних дір, у процесі виявлення та вивчення динаміки руху корональних викидів маси в міжпланетному просторі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Шкловский И. С. Солнечная корона. – М.-Л.: ГИТТЛ, 1951. – 388 с.
2. Шкловский И. С. Физика солнечной короны. – М.: Физматгиз, 1962. – 516 с.
3. Hewish A., Scott P. F., and Wills D. Interplanetary Scintillation of Small Diameter Radio Sources // Nature. – 1964. – Vol. 203, No. 4951. – P. 1214–1217. DOI: 10.1038/2031214a0
4. 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, No. 5029. – P. 1188–1189. DOI: 10.1038/2091188a0
5. Фалькович И. С., Калініченко 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.
6. Оляк М. Р. Об использовании методов статистической радиофизики для анализа межпланетных мерцаний в декаметровом диапазоне радиоволн // Вісн. Харків. нац. ун-ту. Радиофізика та електроніка. – 2002. – № 570, вип. 2. – С. 210–211.
7. Оляк М. Р. Об особенностях применения метода дисперсионного анализа при исследованиях солнечного ветра в декаметровом диапазоне радиоволн // Радиофизика и радиоастрономия. – 2005. – Т. 10, № 4. – С. 385–391.
8. Алексеев Г. А., Гельфрейх Г. Б., Зайцев В. В., Илясов Ю. П., Кайдановский Н. Л., Матвеев Л. И., Мень А. В., Молчанов А. П., Степанов А. П., Шишов В. И. Советские радиотелескопы и радиоастрономия Солнца. – М.: Наука, 1990. – 212 с.
9. Cronyn W. M. The analysis of radio scattering and space-probe observations of small-scale structure in the interplanetary medium // Astrophys. J. – 1970. – Vol. 61. – P. 755–763. DOI: 10.1086/150576
10. Брауде С. Я., Мень А. В., Содин Л. Г. Радиотелескоп декаметрового диапазона волн УТР-2 // Антенны. – М.: Связь, 1978. – № 26. – С. 3–15.
11. Мень А. В., Шарыкин Н. К., Захаренко В. В., Булацен В. Г., Браженко А. И., Ваццишин П. В. Радиотелескоп декаметрового диапазона длин волн УРАН-2 // Радиофизика и радиоастрономия. – 2003. – Т. 8, № 4. – С. 345–356.
12. 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: 10.1051/0004-6361/200913335
13. Марпл С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. – М.: Мир, 1990. – 584 с.
14. Оляк М. Р. Large-scale structure of solar wind and geomagnetic phenomena // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. – 2012. – Vol. 86. – P. 34–40. DOI: 10.1016/j.jastp.2012.06.011

15. Hayashi K., Kojima M., Tokumaru M., and Fujiri K. MHD tomography using interplanetary scintillation measurement // *Geophys. Res. Spase Phys.* – 2003. – Vol. 108, Is. A3. – P. 1102–1123. DOI: 10.1029/2002JA009567

REFERENCES

1. SHKLOVSKY, I. S., 1951. Solar corona. – Moscow-Leningrad, Russia: GITTL Publ. (in Russian).
2. SHKLOVSKY, I. S., 1962. *Physic of solar corona*. Moscow, Russia: Fizmatgiz Publ. (in Russian).
3. HEWISH, A., SCOTT, P. F. and WILLS, D., 1964. Interplanetary scintillation of small diameter radio sources. *Nature*. vol. 203, no. 4951, pp. 1214–1217. DOI: 10.1038/2031214a0
4. HEWISH, A., DENNISON, P. A. and PILKINGTON, J. D. H., 1966. Measurements of the size and motion of the irregularities in the interplanetary medium. *Nature*. vol. 209, no. 5029, pp. 1188–1189. DOI: 10.1038/2091188a0
5. FALKOVICH, I. S., KALINICHENKO, N. N., GRIDIN, A. A. and BUBNOV, I. N., 2004. On the Possibility of Broadband IPS Observations at Decameter Waves. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 9, no. 2, pp. 121–129 (in Russian).
6. OLYAK, M. R., 2002. On the application of statistical radiophysics methods for the analysis of decameter interplanetary scintillations. *Visn. Khark. Nats. Univ. Radiofizyka ta Elektronika*. no. 570, ser. 2, pp. 210–211 (in Russian).
7. OLYAK, M. R., 2005. On the peculiarities of the analysis-of-variance method application in the decameter wavelength study of solar wind. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 10, no. 4, pp. 385–391 (in Russian).
8. ALEKSEEV, G. A., GEL'FREIKH, G. B., ZAITSEV, V. V., ILIASOV, I. P., KAIDANOVSKII, N. L., MATVEENKO, L. I., MEGN, A. V., MOLCHANOV, A. P., STEPANOV, A. P. and SHISHOV, V. I., 1990. *Soviet radio telescopes and solar radio astronomy*. Moscow, Russia: Nauka Publ. (in Russian).
9. CRONYN, W. M., 1970. The analysis of radio scattering and space-probe observations of small-scale structure in the interplanetary medium. *Astrophys. J.* vol. 61, pp. 755–763. DOI: 10.1086/150576
10. BRAUDE, S. Y., MEGN, A. V. and SODIN, L. G., 1978. Decameter wave band radio telescope UTR-2. In: *Anteny*. Moscow, USSR: Svyaz' Publ. no 26, pp. 3–15 (in Russian).
11. MEGN, A. V., SHARYKIN, N. K., ZAKHARENKO, V. V., BULATSEN, V. G., BRAZHENKO, A. I. and VASCHISHIN, R. V., 2003. Decameter Wavelength Radio Telescope URAN-2. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 8, no 4, pp. 345–356 (in Russian).
12. RYABOV, V. B., VAVRIV, D. M., ZARKA, P., RYABOV, B. P., KOZHIN, R. V., VINOGRADOV, V. V. and DENIS, L., 2010. 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.* vol. 510, id. A16. DOI: 10.1051/0004-6361/200913335

13. MARPL, S. L. 1990. *Digital spectral analysis with applications*. Moscow, Russia: Mir Publ. (in Russian).
14. OLYAK, M. R., 2012. Large-scale structure of solar wind and geomagnetic phenomena. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* vol. 86, pp. 34–40. DOI: 10.1016/j.jastp.2012.06.011
15. HAYASHI, K., KOJIMA, M., TOKUMARU, M. and FUJIRI, K., 2003. MHD tomography using interplanetary scintillation measurement. *Geophys. Res. Spase Phys.* vol. 108, is. A3, pp. 1102–1123. DOI: 10.1029/2002JA009567

*N. N. Kalinichenko*¹, *M. R. Olyak*¹, *A. A. Konovalenko*¹,
*I. N. Bubnov*¹, *S. N. Yerin*¹, *A. I. Brazhenko*²,
*O. L. Ivantishin*³, and *O. A. Lytyynenko*¹

¹Institute of Radio Astronomy, National Academy of Sciences of Ukraine,
4, Mystetstv 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

³Karpenko Physico-Mechanical Institute, National Academy of Sciences of Ukraine,
5, Naukova St., Lviv, 79060, Ukraine

SOLAR WIND INVESTIGATIONS BY OBSERVATIONS OF INTERPLANETARY SCINTILLATIONS OF COSMIC RADIO SOURCES AT DECAMETER WAVELENGTHS

Purpose: Description of the solar wind investigation technique based on interplanetary scintillation observations of the decameter radio emission of space radio sources.

Design/methodology/approach: The method is based on using the Feynman pass integral technique for calculation of statistic characteristics of interplanetary scintillations.

Findings: The technique of determination of a stream structure of the solar wind beyond the Earth's orbit is created. The technique is based on the analysis of temporary, frequency and space characteristics of the interplanetary scintillations of decameter radio emission of space radio sources. Identification of this kind stream structure opens unique opportunities for the interplanetary plasma physics study. In particular, the difference in parameters of interplanetary plasma streams can be used for investigation of high-speed streams of solar wind from coronal holes, identification and studying of dynamics of driving of coronal mass ejections in the interplanetary space. The latter will allow, for example, to develop a reliable technique for estimation of arrival time of coronal mass emissions to the Earth, being of undoubted interest from the space weather forecast viewpoint.

Conclusions: It is shown that the modern progress in digital technique and data analysis methodologies allows to use the observations of the interplanetary scintillations of cosmic radio source radio emission for determination of the solar wind parameters, reconstruction of the solar wind stream structure, detection and investigation of dynamics of coronal mass ejections beyond the Earth's orbit.

Key words: solar wind, interplanetary scintillations, decameter range

Н. Н. Калініченко¹, М. Р. Оляк¹, А. А. Коноваленко¹,
И. М. Бубнов¹, С. М. Ерин¹, А. И. Браженко²,
О. Л. Ивантишин³, О. А. Литвиненко¹

¹Радиоастрономический институт НАН Украины,
ул. Мистецтв, 4, г. Харьков, 61002, Украина

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

³Физико-механический институт им. Г. В. Карпенко
НАН Украины,
ул. Наукова, 5, г. Львов, 79060, Украина

ИССЛЕДОВАНИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА
ПОСРЕДСТВОМ НАБЛЮДЕНИЙ
МЕЖПЛАНЕТНЫХ МЕРЦАНИЙ
КОСМИЧЕСКИХ РАДИОИСТОЧНИКОВ
В ДЕКАМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ РАДИОВОЛН

Предмет и цель работы: описание методики исследований
солнечного ветра, которая базируется на наблюдениях мерцаний
декаметрового радиоизлучения космических радио-
источников.

Методы и методология: Методика основана на использо-
вании метода фейнмановских интегралов по траекториям
для расчета статистических характеристик межпланетных
мерцаний.

Результаты: Создана методика определения потоковой
структуры солнечного ветра за орбитой Земли. Методика
основана на анализе временных, частотных и пространствен-
ных характеристик межпланетных мерцаний декаметрового
радиоизлучения космических радиоисточников. Выявление
потоковой структуры открывает уникальные возможности
для исследований физики межпланетной плазмы. В частно-
сти, разница в параметрах потоков межпланетной плазмы мо-
жет быть использована для исследований высокоскоростных
потоков солнечного ветра из корональных дыр, выявления и
изучения динамики движения корональных выбросов массы
в межпланетном пространстве. Последнее позволит, напри-
мер, разработать надежную методику оценки времени при-
хода корональных выбросов массы к Земле, что представля-
ет безусловный интерес с точки зрения прогноза космичес-
кой погоды.

Заключение: Показано, что современный прогресс в цифро-
вой технике и методиках анализа данных позволяет эффектив-
но использовать наблюдения межпланетных мерцаний
радиоизлучения космических радиоисточников для определе-
ния параметров солнечного ветра, реконструкции потоковой
структуры солнечного ветра, выявления и исследования
динамики корональных выбросов массы за орбитой Земли.

Ключевые слова: солнечный ветер, межпланетные мерцания,
декаметровый диапазон

Статья поступила в редакцию 07.12.2016