

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2019.01.027>

УДК 523.164.42

**М. М. Калініченко¹, М. Р. Оляк¹, О. О. Коноваленко¹,
А. І. Браженко², Н. В. Кугай¹, О. І. Романчук¹**

¹Радіоастрономічний інститут Національної академії наук України
вул. Мистецтв 4, Харків, Україна, 61002

²Гравіметрична обсерваторія Інституту геофізики Національної академії наук України
вул. М'ясоєдова 27/29, Полтава, Україна, 36014
kalinich@ri.kharkov.ua

Великомасштабна структура сонячного вітру за орбітою Землі, реконструйована з використанням даних вимірювань міжпланетних мерехтінь у двох пунктах на декаметрових радіохвилях

Сонячний вітер — це набір потоків з різними параметрами (швидкість, показник степеня спектру неоднорідностей, ширина та інші). Бімодальний характер розподілу швидкості сонячного вітру експериментально було встановлено під час вимірювань на космічних апаратах. А космічний апарат «Улісс» підтвердив, що бімодальна структура сонячного вітру зберігається на відносно великих відстанях від Сонця (в декілька астрономічних одиниць). Але є інший спосіб для встановлення потокової структури сонячного вітру — це метод міжпланетних мерехтінь. Мета роботи — реконструкція великомасштабної структури сонячного вітру за орбітою Землі з використанням даних спостережень міжпланетних мерехтінь у двох пунктах. Експерименти проводилися на декаметрових радіохвилях, оскільки останні досить сильно розсіюються розрідженою міжпланетною плазмою за орбітою Землі. Експериментальні дані, які аналізувалися в цій роботі, були отримані шляхом синхронних спостережень міжпланетних мерехтінь на радіотелескопах УТР-2 та УРАН-2. Визначення параметрів сонячного вітру та його великомасштабної структури проводилося шляхом зіставлення експериментальних кривих (залежностей швидкості гармонік крос-спектру мерехтінь та спектрів потужності) з цими ж характеристиками міжпланетних мерехтінь, але одержаними шляхом розрахунку. Для розділення міжпланетних та іоносферних мерехтінь застосовувалися спектральний, просторовий та частотний критерії. Результати цього дослідження

© М. М. КАЛІНІЧЕНКО, М. Р. ОЛЯК, О. О. КОНОВАЛЕНКО, А. І. БРАЖЕНКО,
Н. В. КУГАЙ, О. І. РОМАНЧУК, 2019

показують, що сонячний вітер за орбітою Землі складається з різних потоків, які змінюють один одного на промені зору на джерело. Проведені дослідження підтверджують надійність та ефективність методу міжпланетних мерехтінь при його використанні для реконструкції потокової структури сонячного вітру.

Ключові слова: сонячний вітер, великомасштабна структура, міжпланетні мерехтіння.

ВСТУП

Сонячний вітер — це постійний потік заряджених часток, в основному електронів та протонів, з поверхні Сонця у космічний простір. У звичайних умовах спостерігаються дві моди — повільний сонячний вітер із швидкістю близько 350 км/с та швидкий сонячний вітер із швидкістю близько 750 км/с [10, 20, 26, 27]. В періоди мінімуму сонячної активності швидкий розріджений сонячний вітер витікає з корональних дір поблизу полюсів Сонця, а повільний сонячний вітер великої густини залишає поверхню Сонця поблизу екватора світила. У періоди максимуму сонячної активності ситуація складніша — Сонячна система наповнена повільним сонячним вітром з вузькими потоками швидкого сонячного вітру, який витікає з різних сонячних широт. Більше того, самі потоки можуть мати досить складну структуру [27]. Тому можна стверджувати, що сонячний вітер — це набір потоків з різними параметрами.

Бімодальний характер розподілу швидкості сонячного вітру експериментально був встановлений під час вимірювань на космічних апаратах. А космічний апарат «Улісс» підтвердив, що бімодальна структура сонячного вітру зберігається на відносно великих відстанях від Сонця у декілька астрономічних одиниць (а. о.) [24, 25]. Між тим є також інша можливість для досліджень сонячного вітру і встановлення потокової структури сонячного вітру. Неоднорідності міжпланетної плазми спричиняють в точці прийому флуктуації інтенсивності сигналів космічних радіоджерел, або міжпланетні мерехтіння [15]. Спостереження міжпланетних мерехтінь також дозволяють визначати параметри сонячного вітру [10, 11]. Для цього застосовуються вимірювання в декількох пунктах та крос-кореляційний аналіз [7, 9—11, 13, 17, 21, 29]. Оскільки потік сонячного вітру майже радіальний (на відстанях від Сонця, де спостереження міжпланетних мерехтінь стають можливими), часто експерименти проводять з використанням лише двох радіотелескопів, які створюють одну довгу радіальну базу. Для інтерпретації даних вимірювань застосовують багатопотокову модель сонячного вітру. Так, в роботі [13] дані спостережень мерехтінь, отримані з допомогою радіотелескопів EISCAT-MERLIN, інтерпретувалися з використанням трипотокової моделі сонячного вітру. Також є метод дисперсійного аналізу, близький до крос-кореляцій-

ного методу, в якому проводиться аналіз залежностей швидкості гармонік крос-спектру мерехтінь. Вперше метод дисперсійного аналізу був запропонований для досліджень іоносфери Землі в роботі [16]. В роботі [21] цей метод розвинуто для досліджень міжпланетної плазми. А в роботі [23] запропоновано метод для досліджень сонячного вітру за орбітою Землі на відстанях більше 1 а. о., а також проаналізовано дисперсійні залежності фазової швидкості для багатопотокової моделі сонячного вітру.

Ефективність вимірювань міжпланетних мерехтінь, серед іншого, залежить від частоти спостережень. Високі частоти (> 100 МГц) ефективні на елонгаціях (кут між напрямком на Сонце та променем зору на джерело космічного випромінювання) менше 90° . Низькі частоти (< 100 МГц) дозволяють оцінювати параметри сонячного вітру як на малих (менше 90°), так і великих елонгаціях ($> 90^\circ$) [2, 12]. Останні відповідають сонячному вітру за орбітою Землі, де високі частоти слабо розсіюються розрідженою міжпланетною плазмою.

Мета роботи — показати приклад реконструкції потокової структури сонячного вітру з використанням методу, який був запропонований в роботі [23]. У статті використано дані двопунктових спостережень міжпланетних мерехтінь на радіотелескопах УТР-2 та УРАН-2.

СПОСТЕРЕЖЕННЯ

У Радіоастрономічному інституті НАН України спостереження міжпланетних мерехтінь з використанням радіотелескопа УТР-2 проводяться з 1978 р., а з використанням додатково радіотелескопів УРАН-2 (Полтава), УРАН-3 (Львів), УРАН-4 (Одеса) — з 2006 р. На рис. 1 показано місцеположення радіотелескопів УТР-2, УРАН-1, -2, -3, -4. Спостереження, які аналізуються в даній статті, були отримані синхронно на радіотелескопах УТР-2 [1] та УРАН-2 [18], база 152 км, орієнтація схід — захід. Основні параметри радіотелескопа УТР-2: смуга робочих частот 8...32 МГц, лінійні розміри 2×1 км, 2040 антенних елементів, ефективна площа 150000 м^2 , діаграма спрямованості < 30 на частоті 25 МГц, низький рівень бокових пелюсток (< -13 дБ).



Рис. 1. Радіотелескопи УТР-2 та УРАН-1, -2, -3, -4 на карті України

Є можливість електронного керування променем радіотелескопа в широкому діапазоні кутів та одночасного спостереження у п'яти просторово рознесених променях. В останні роки радіотелескоп УТР-2 був модернізований та оснащений надсучасними широкосмуговими системами підсилення, прийому та реєстрації даних [6, 30]. Радіотелескоп УРАН-2 включає 512 широкосмугових диполів. Його розміри 238×118 м (площа 28000 м^2). Ширина діаграми спрямованості радіотелескопа 7×3 на частоті 25 МГц, і він також дозволяє електронне керування променем. Незважаючи на меншу ефективну площу, радіотелескоп УРАН-2 забезпечує достатню чутливість при спостереженнях мерехтінь космічних радіоджерел з потоком 100 Ян та більше. Обидва інструменти оснащені системами точного часу, що дає можливість проведення на них синхронних спостережень і крос-кореляційного аналізу, та широкосмуговими цифровими приймачами з високою динамікою DSP-z [30]. Цифровий приймач DSP-z дозволяє проводити ефективні радіоастрономічні експерименти за наявності перешкод різної природи, що характерно для спостережень на низьких частотах.

Кожного дня з 12 по 17 січня 2016 р. радіоджерело 3C144 (координати: $\alpha = 05^{\text{h}}31^{\text{m}}05^{\text{s}}$ та $\delta = 21^{\circ}59'$, потік компактного компонента 1000 Ян на частоті 25 МГц) спостерігалось на часових кутах ~ 2 год поблизу верхньої кульмінації сканами тривалістю 4 хв. Для обробки вибиралися часові реалізації процесу мерехтінь тривалістю 30 с. Спостереження проводилися вночі (елонгація $\sim 150^\circ$). Записи даних отримувалися з використанням цифрового приймача DSP-z з параметрами реєстрації: діапазон робочих частот 20.63...28.88 МГц, постійна інтегрування — 20 мс. В DSP-z сигнал радіоджерела $x(t)$ конвертується у двовимірну спектрограму $I(t, f)$, яку прийнято називати динамічним спектром.

$$I(t, f) = |X(t, f)|^2,$$

$$X(t, f) = \frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} x(\tau) g(\tau - t) e^{i2\pi f \tau} d\tau,$$

$$T = N_w t_s,$$

де $g(t)$ — «функція вікна», N_w — розмір вікна, $t_s = 1/f_s$ — часова роздільна здатність, f_s — частота оцифровки. При $N_w = 214 = 16384$, $f_s = 66$ МГц маємо 2048 частотні фур'є-канали в динамічному спектрі.

Рис. 2а, 2б показують приклади динамічних спектрів (потужність на площині «час/частота»), які були отримані синхронно на радіотелескопах УТР-2 та УРАН-2. Перерізи динамічних спектрів на частоті 25 МГц наведено на рис. 2в. Хоча два перерізи і не ідентичні, є дуже багато схожих особливостей в них, розділених часовим запізненням.

З метою оцінювання параметрів сонячного вітру дані, отримані на радіотелескопах УТР-2 та УРАН-2, було піддано ряду стадій первинної обробки. По-перше, оскільки спостереження компактних джерел

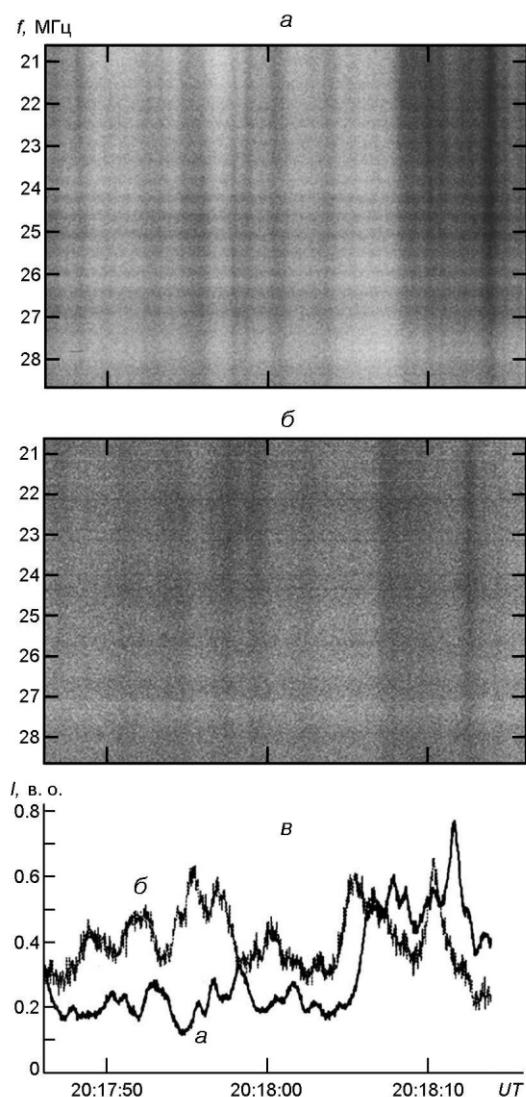


Рис. 2. Динамічні спектри, синхронно отримані на радіотелескопах УТР-2 (а) і УРАН-2 (б), та їхні перерізи на частоті 25 МГц (в)

космічного радіовипромінювання виявляють їхнє мерехтіння також і на неоднорідностях іоносферної плазми, дані, які містили вплив іоносфери Землі, виключалися з подальшої обробки. Для виявлення таких даних застосовувалися спектральний, просторовий та частотний критерії розділення міжпланетних та іоносферних мерехтінь [3]. На відміну від іоносферних мерехтінь, міжпланетні мерехтіння високо корельовані на базі УТР-2 — УРАН-2 (152 км) та у смузі робочих частот 20.63...28.88 МГц [3, 4] та мають значно ширший спектр. По-друге, виключалися частотні фур'є-канали, спотворені перешкодами. Частотні канали, вільні від перешкод, усереднювалися для отримання більшого відношення сигнал/шум. Потім оцінювалися експериментальні спектри потужності та дисперсійні залежності.

МОДЕЛЬ

Для реконструкції потокової структури сонячного вітру теоретичні характеристики порівнювалися з експериментальними. Ми використовували метод, який був запропонований і описаний в роботі [23].

Коротко метод полягає в наступному. Ми припускаємо, що промінь зору на радіоджерело (вісь z) перетинає M потоків сонячного вітру, які поширюються від Сонця. Товщина, яку займає m -й потік у напрямку джерела, становить l_m , $m = 1, \dots, M$. Розглянемо автокореляційну функцію флуктуацій інтенсивності у вигляді

$$B(\vec{r}, t) = \langle I(\vec{r}, t) I^*(\vec{r}, t) \rangle$$

і просторову крос-кореляційну функцію у вигляді

$$B(\vec{b}, t) = \langle I(\vec{r}, t) I^*(\vec{r} + \vec{b}, t) \rangle$$

Тут $I(\vec{r}, t)$ — інтенсивність випромінювання, \vec{r} — радіус-вектор, \vec{b} — вектор бази, кутовими дужками позначено усереднення по статистичному ансамблю. Дано означення спектру потужності у вигляді

$$W(f) = B(f) \exp(2if) d$$

а крос-спектру —

$$W(\vec{b}, f) = B(\vec{b}, f) \exp(2if) d$$

Використовуючи метод фейнманівських інтегралів по траєкторіях [14], отримуємо спектр потужності $W(f)$ і крос-спектр $W(b, f)$:

$$W(f) = \sum_{m=1}^M W_m(v_m, f), \tag{1}$$

$$W_m(v_m, f) = 2 I_0^2 l_m \frac{4 r_e^2}{k} \int_0^{2\pi} d\phi \sin^2 \left(\frac{2\pi l_m}{2k} \right) \frac{N_m(\phi, 0)}{\sqrt{(v_m^2 - 4f^2)}} \exp \left[\frac{1}{2} \left(\frac{2\pi l_m}{2k} \right)^2 d \right]$$

$$W(b, f) = \sum_{m=1}^M W_m(b, v_m, f), \tag{2}$$

$$W_m(b, v_m, f) = 2 I_0^2 l_m \frac{4 r_e^2}{k} \int_0^{2\pi} d\phi \sin^2 \left(\frac{2\pi l_m}{2k} \right) \exp \left[\frac{2ifb \cos \phi}{v_m} \right]$$

$$\frac{N_m(r_m, 0, \theta)}{\sqrt{(v_m^2 - 4f^2)}} \exp\left(\frac{1}{2} L^2 - 2 \frac{z}{l_m} d_m\right),$$

де $W_m(v_m, f)$ і $W_m(b, v_m, f)$ виникають внаслідок розсіювання на неоднорідностях в m -му потоці, $k = 2f_0/c$, f_0 — частота випромінювання, $(1 - z/l_m)$, $v_m(\theta) = v_m \sin \theta / R_m(\theta)$, $R_m(\theta)$ — радіус-вектор точки на промені зору в напрямку на джерело випромінювання в астрономічних одиницях, L — елонгація, $L = l_m$, $N_m(r_m, 0, \theta)$

$N_m^2(\theta) = n_m^2 \exp(-2 \frac{z}{l_m} d_m)$ — тривимірний просторовий спектр флуктуацій електронної концентрації в m -му потоці, $N_m^2(\theta) = N_m^2(AU) / R_m^2(\theta)$ — дисперсія флуктуацій електронної концентрації в m -му потоці, $N_m^2(AU)$ — величина $N_m^2(\theta)$ на орбіті Землі, n_m — показник степеня спектру неоднорідностей, l_m — внутрішній масштаб турбулентності, \vec{v}_m — перпендикулярна складова хвильового поля, θ — кут між базою та поперечною складовою $\vec{v}_m(\theta)$ швидкості в m -му потоці, I_0 і θ_0 — яскравість та кутові розміри джерела відповідно. Параметр l_m описує закон зменшення флуктуацій електронної концентрації і ефективну товщину розсіювального шару.

Припустимо, що кут між поперечною складовою швидкості \vec{v}_m і вектором бази \vec{b} не змінюється при переході від одного потоку до іншого: $\theta = \theta_m$. За аналогією з роботою [21] введемо швидкість гармонік крос-спектру (дисперсійну залежність) у вигляді

$$V_f(f) = 2 f b \cos \theta. \quad (3)$$

Тут величина $\arccos(\text{Re}W(b, f)/|W(b, f)|)$ — зсув фази між антенами для f -гармоніки крос-спектру $W(b, f)$. Для розрахунку проекції вектора бази b і кута θ для часу спостережень використовуються координати бази, Сонця, радіоджерела та відповідні геометричні вирази.

Міжпланетні мерехтіння містять внесок всіх ділянок міжпланетного середовища на промені зору від радіоджерела до спостерігача, але вклад кожної ділянки різний і залежить від електронної концентрації. «Розсіювальний потенціал» сферично-симетричного сонячного вітру зменшується із збільшенням відстані від Сонця в першому наближенні за законом R^{-4} (де R — відстань від Сонця в астрономічних одиницях). На малих елонгаціях і високих частотах максимальне розсіювання має місце в точці максимального наближення променя зору до Сонця. Головна особливість спостережень на великих елонгаціях та низьких частотах — це не тільки той факт, що середовище, яке ефективно розсіює радіовипромінювання космічних джерел, є суттєво протяжним (товщина відповідного шару досягає 3...4 а. о. [5], але й той факт, що шар з найбільшою електронною концентрацією розташований поблизу спостерігача. Формули (1)—(3) добре описують міжпланетні мерехтіння в цьому випадку і дозволяють нам оцінити ширину потоків сонячного вітру.

МОДЕЛЮВАННЯ

Порівняння експериментальних характеристик з аналогічними залежностями, але розрахованими для різних моделей сонячного вітру, часто використовується для визначення параметрів сонячного вітру [19]. У нашому випадку ця процедура була аналогічна до описаної в роботі [23]. Ми використовували одно-, дво- та трипотоккові моделі сонячного вітру ($M = 1, 2, 3$ відповідно). Висновок про справедливість тієї чи іншої моделі робився на основі порівняння відповідних їм середніх квадратичних похибок. Вибиралась модель з найменшою похибкою. Головна причина застосування у ряді днів дво- та трипотоккової моделі пов'язана з формою вимірних дисперсійних залежностей — вона не відповідає однопотоковій моделі. У роботі [23] показано, що у випадку однопотокової моделі, декаметрового діапазону і великих елонгацій відношення різниці значень дисперсійної кривої в області високих частот та на нульовій частоті до максимального значення швидкості лежить в діапазоні 20...30 % (рис. 3а). Якщо це відношення в експериментальній дисперсійній залежності менше, ніж зазначена вище величина, то найкраще узгодження з модельною кривою досягається використанням двопотокової моделі, при цьому повільний потік розташовується поблизу Землі, а високошвидкісний потік — далі у міжпланетному просторі на промені зору. Навпаки, якщо відношення перевищує 30 %, то потік з більшою швидкістю розташовується поблизу Землі (рис. 3б). Для трьох днів найкращий збіг експериментальних та модельних залежностей має місце для трипотоккової моделі сонячного вітру, коли третій вузький потік розташовувався поблизу Землі (рис. 3в).

Результати моделювання для 12, 13 та 14 січня 2016 р., коли використовувалися різні моделі (одно-, дво- та трипотоккова моделі), показано на рис. 3 та рис. 4.

Наявність декількох потоків сонячного вітру також позначається на формі спектру потужності (рис. 4). Якщо більше ніж один потік наявний на промені зору на джерело, то у спектрі потужності виникають додаткові особливості (рис. 4б, 4в). Ці особливості не є так званим ефектом фільтра Френеля, оскільки останнього не видно на спектрах потужності внаслідок значної протяжності розсіювального шару на низьких частотах [12]. В роботі [28] показано, що такого роду особливості спектрів, отриманих на низьких частотах, можливо пояснити впливом великомасштабних збурень в сонячному вітрі.

Форма дисперсійної кривої сильно залежить від ширини потоку сонячного вітру, розташованого близько до Землі. Нахил дисперсійної кривої слабо залежить від ступеня спектру міжпланетної турбулентності. Максимальний нахил дисперсійної кривої має місце за наявності високошвидкісного потоку поблизу Землі. У випадку ж, коли повільний потік перетинає промінь зору на джерело поблизу Землі, нахил дисперсійної кривої зменшується. Більше деталей про метод можна знайти в роботах [22, 23].

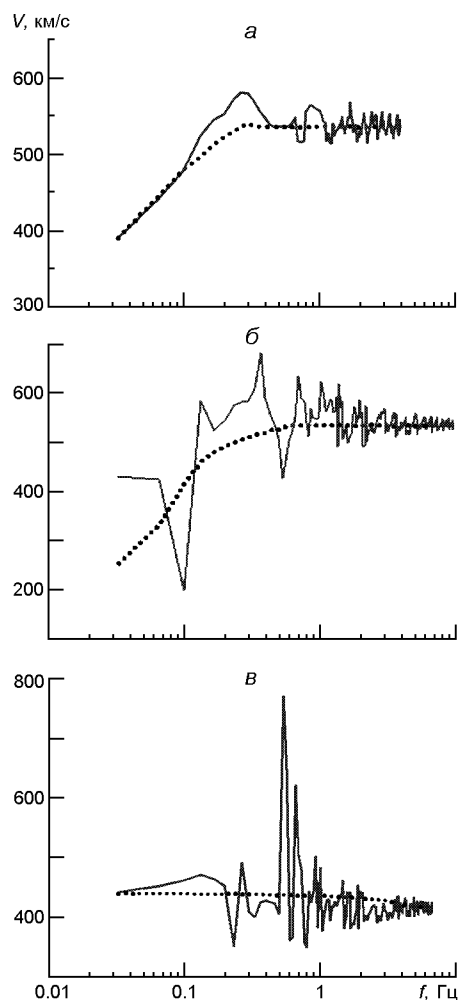


Рис. 3. Експериментальні (суцільні лінії) та розрахункові (пунктир) дисперсійні залежності $V(f)$: *a* — однопотокова модель для 12 січня 2016 р., *б* — двопотокова модель (13 січня), *в* — трипотокова модель (14 січня)

Необхідно зазначити, що спектр потужності міжпланетних мерехтінь вже використовувався в декаметровому діапазоні радіохвиль для визначення параметрів сонячного вітру [8]. Але в цих ранніх дослідженнях експериментальний спектр потужності вимірювався в діапазоні одного-двох порядків по потужності (використовувався приймач зі смугою пропускання 300 кГц). Внаслідок використання в наших спостереженнях широкосмугового цифрового приймача DSP-z нам вдалося отримувати ефективну смугу робочих частот до 7 МГц і відповідно оцінювати експериментальний спектр потужності в діапазоні до 4-5 порядків по потужності. Так що області, відповідальні за різні потоки сонячного вітру, ставали добре видимими на спектрі потужності.

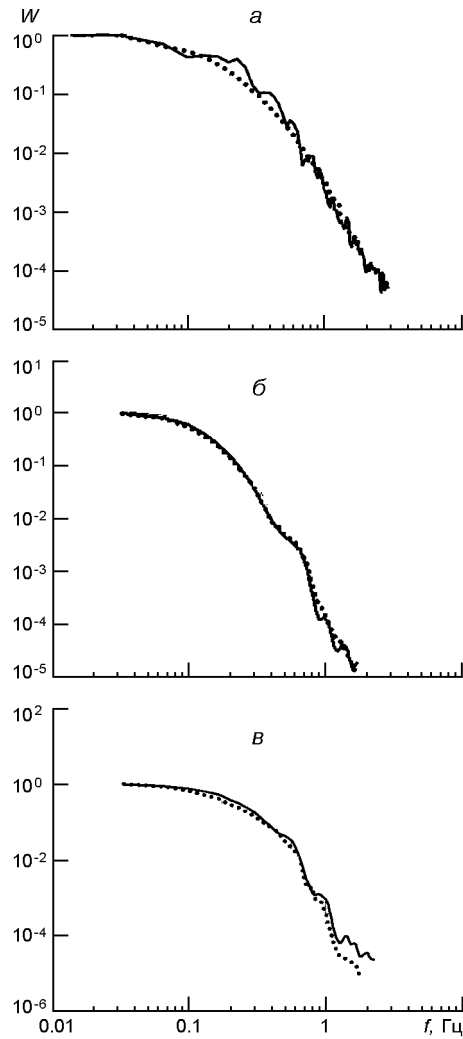


Рис. 4. Експериментальні (суцільні лінії) та розрахункові (пунктир) спектри потужності $W(f)$: *a* — однопотокова модель для 12 січня 2016 р., *б* — двопотокова модель (13 січня), *в* — трипотокова модель (14 січня)

ДИСКУСІЯ ТА ВИСНОВКИ

На рис. 5 показано реконструйовану великомасштабну структуру сонячного вітру на промені зору на радіоджерело 3C144 для шести послідовних суміжних днів. Потoki з різними параметрами позначені різними кольорами. Швидкість сонячного вітру, яка була оцінена методом міжпланетних мерехтінь, узгоджується із швидкістю, яка була виміряна на КА SOHO, WIND та іншими поблизу Землі. Так, з 12 по 15 січня 2016 р. швидкість сонячного вітру, виміряна з допомогою космічних апаратів, була більшою за 500 км/с, а в наступні дні (16 та 17 січня) зменшилася (рис. 6). Швидкість потоків сонячного вітру поблизу Землі для 16 та 17 січня 2016 р. дещо нижча, ніж виміряна з допомогою космічних апаратів. Цю різницю можна пояснити помилка-

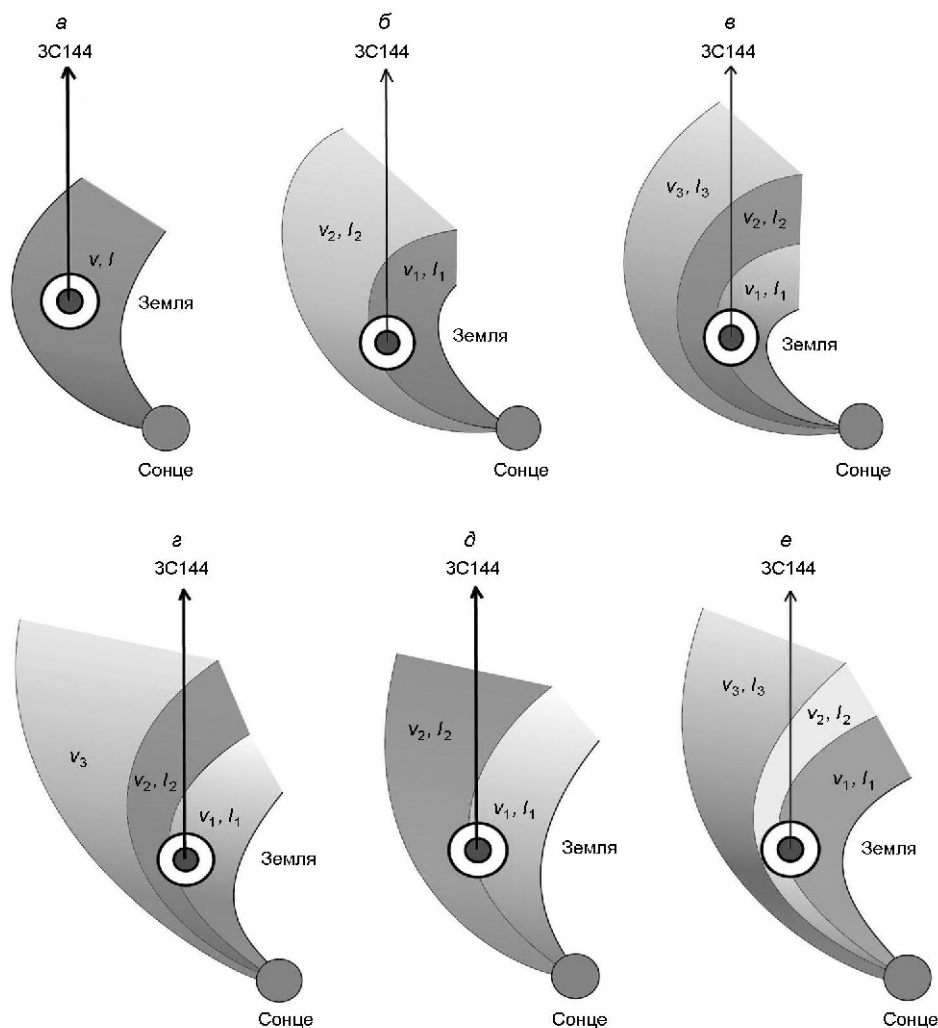


Рис. 5. Структура сонячного вітру для шести послідовних суміжних днів 2016 р.:

- а — 12 січня, один потік ($v = 540$ км/с, $n = 3.8$, $a = 2.8$, $l = 0.7$ а. о.);
 б — 13 січня, два потоки ($v_1 = 530$ км/с, $n_1 = 3.9$, $a_1 = 2.6$, $l_1 = 0.4$ а. о.,
 $v_2 = 400$ км/с, $n_2 = 3.9$, $a_2 = 2.2$, $l_2 = 2.0$ а. о.);
 в — 14 січня, три потоки ($v_1 = 400$ км/с, $n_1 = 3.8$, $a_1 = 2.8$, $l_1 = 0.2$ а. о.,
 $v_2 = 540$ км/с, $n_2 = 3.7$, $a_2 = 2.8$, $l_2 = 0.3$ а. о., $v_3 = 480$ км/с, $n_3 = 3.8$, $a_3 = 2.5$, $l_3 = 0.5$ а. о.);
 г — 15 січня, три потоки ($v_1 = 450$ км/с, $n_1 = 3.9$, $a_1 = 2.5$, $l_1 = 0.4$ а. о.,
 $v_2 = 560$ км/с, $n_2 = 3.8$, $a_2 = 2.8$, $l_2 = 0.6$ а. о., $v_3 = 290$ км/с, $n_3 = 3.8$, $a_3 = 2.0$);
 д — 16 січня, два потоки ($v_1 = 280$ км/с, $n_1 = 3.7$, $a_1 = 2.5$, $l_1 = 0.3$ а. о.,
 $v_2 = 400$ км/с, $n_2 = 3.7$, $a_2 = 2.5$, $l_2 = 1.0$ а. о.);
 е — 17 січня, три потоки ($v_1 = 260$ км/с, $n_1 = 3.7$, $a_1 = 2.7$, $l_1 = 0.2$ а. о.,
 $v_2 = 230$ км/с, $n_2 = 3.9$, $a_2 = 2.5$, $l_2 = 0.2$ а. о., $v_3 = 300$ км/с, $n_3 = 3.7$, $a_3 = 2.8$, $l_3 = 2.0$ а. о.)

ми методу або геліоширотною залежністю параметрів сонячного вітру. Яка природа потоків сонячного вітру, що виявляються методом міжпланетних мерехтін? На наш погляд, це можуть бути як потоки у звичному значенні слова, так і великомасштабні структури у межах одного потоку. Останнє, можливо, реалізувалось в останній день спостережень (17 січня 2016 р.), коли були виявлені три потоки сонячного вітру з невеликою різницею швидкостей.

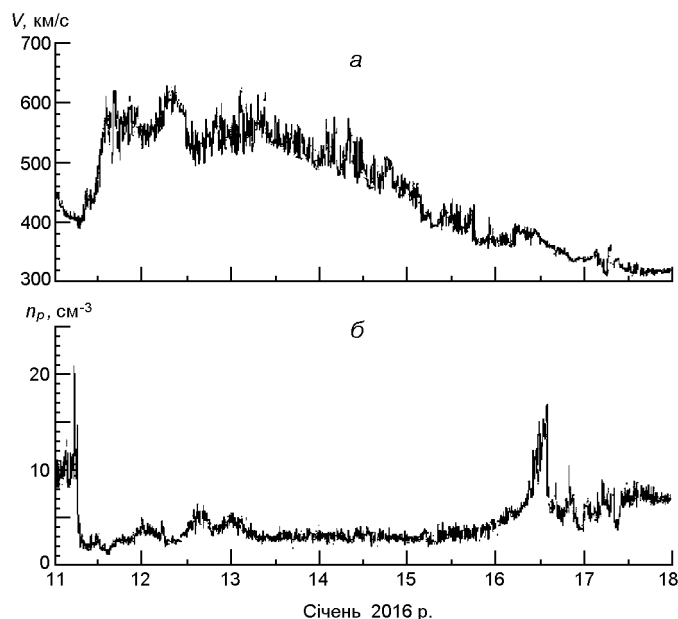


Рис. 6. Параметри сонячного вітру на орбіті Землі (космічний апарат «Вінд», OMNI Web Service, https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/sc_merge_min1.html)

Подальший прогрес в цих дослідженнях пов'язаний з використанням більшої кількості радіоджерел. Також викликає інтерес використання в наступних спостереженнях інших європейських радіотелескопів з синхронним спостереженням одних і тих же радіоджерел, оскільки роздільна здатність методу міжпланетних мерехтінь покращується зі збільшенням бази спостережень. Такий підхід ще цікавий і з точки зору виявлення іоносферного впливу та перешкод. Подальша робота повинна включати пошук відповідних потоків, що спостерігаються, джерел сонячного вітру. На нашу думку, це дасть можливість сформулювати чітку відповідь на питання про природу потоків сонячного вітру, які виявляються методом міжпланетних мерехтінь в декаметровому діапазоні радіохвиль. У цілому такі спостереження мають великий потенціал як в автономному режимі досліджень, так і як додатковий інструмент у комплексних дослідженнях сонячного вітру.

Ці дослідження були підтримані цільовою комплексною програмою НАН України з наукових космічних досліджень на 2012—2017 рр. в межах проекту «Скоординовані синхронні дослідження об'єктів Сонячної системи методами наземно-космічної низькочастотної радіоастрономії. Комплексні дослідження геофективних проявів сонячної активності».

1. Брауде С. Я., Мень А. В., Содин Л. Г. Радиотелескоп декаметрового діапазона длин волн УТР-2. *Антенны*. 1978, 26. С. 3—15.
2. Калиниченко Н. Н. Мерцания космического радиоисточника 4C21.53 в декаметровом диапазоне волн на элонгациях 43 —138 . *Радиофизика и радиоастро-*

- номія. 2011. 16, № 4. С. 386—393.
3. 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. 18, № 3. С. 210—219.
 4. 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.
 5. Фалькович И. С., Коноваленко А. А., Калиниченко Н. Н., Оляк М. Р., Гридин А. А., Бубнов И. Н., Лекашо А., Рукер Х. О. Вариации параметров струйной структуры солнечного ветра на расстояниях более 1 а. е. в 2003—2004 гг. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2006. 11, № 1. С. 31—41.
 6. Abranin E. P., Bruck Yu. M., Zakharenko V. V., Konovalenko A. A. The New Preamplification System for the UTR-2 Radio Telescope. *Exp. Astron.* 2001. 11. P. 85—112.
 7. Bourgois G., Coles W. A., Daigne G., Silen J., Turunen T., Williams P. J. Measurements of the solar wind velocity with EISCAT. *Astron. and Astrophys.* 1985. 144. P. 452—462.
 8. Bovkoon V. P., Zhouck I. N. Scintillations of cosmic radio sources in the decameter waveband. *Astrophys. and Space Sci.* 1981. 79. P. 165—180.
 9. Breen A. R., Coles W. A., Grall R. R., Klingsmith M. T., Markkanen J., Moran P. J., Tegid B., Williams P. J. S. EISCAT measurements of the solar wind. *Ann. Geophys.* 1996. 14. P. 1235—1245.
 10. Coles W. A. A bimodal model of the solar wind speed. *Astrophys. and Space Sci.* 1996. 243. P. 87—96.
 11. Dennison P. A., Hewish A. The solar wind outside the plane of the ecliptic. *Nature*. 1967. 213. P. 343—346.
 12. Falkovich I. S., Konovalenko A. A., Kalinichenko N. N., Olyak M. R., Gridin A. A., Bubnov I. N., Brazhenko A. I., Lecacheux A., Rucker H. Dispersion analysis of interplanetary scintillations at decameter wavelengths: First Results. *Radio Phys. and Radio Astron.* 2010. 1. P. 3—9.
 13. Fallows R. A., Breen A. R., Dorrian G. D. Developments in the use of EISCAT for interplanetary scintillation. *Ann. Geophys.* 2008. 26. P. 2229—2236.
 14. Frehlich R. G. Space-time fourth moment of waves propagating in random media. *Radio Sci.* 1987. 22. P. 481—490.
 15. Hewish A., Scott P. F., Wills D. Interplanetary scintillations of small diameter radio sources. *Nature*. 1964. 203. P. 1214—1217.
 16. Jones D., Maude A. D. Evidence for wave motions in the E-region in the ionosphere. *Nature*. 1965. 206. P. 177—179.
 17. Kojima K., Ishida Y., Maruyama K., Kakinuma T. An observation system of interplanetary scintillation at UHF. *Proc. Res. Inst. Atmos. Nagoya Univ.* 1982. 29. P. 61.
 18. Konovalenko A. A., Sodin L. G., Zakharenko V. V., Zarka Ph., Ulyanov O. M., Sidorchuk M. A., Stepkin S. V., Tokarsky P. L., Melnik V. N., Kalinichenko N. N., and 62 other authors. The modern radio astronomy network in Ukraine: UTR-2, URAN and GURT. *Exp. Astron.* 2016. 42. P. 11—48.
 19. Manoharan P. K., Ananthakrishnan S. Determination of solar-wind velocities using single-station measurements of interplanetary scintillations. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 1990. 244. P. 691—695.
 20. McComas D. J., Riley P., Gosling J. T., Balogh A., Forsyth R. Ulysses' rapid crossing of the coronal hole boundary. *J. Geophys. Res.* 1998. 103. P. 1955—1967.
 21. Lotova N. A., Chashey I. V. Test for detection of fine structure of solar wind velocity. *Astrophys. and Space Sci.* 1973. 20. P. 251—262.

22. Olyak M. R. Large-scale structure of solar wind and geomagnetic phenomena. *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* 2012. 86. P. 34—40.
23. Olyak M. R. The dispersion analysis of drift velocity in the study of solar wind flows. *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* 2013. 102. P. 185—191.
24. Phillips J. L., Balogh A., Bame S. J., Goldstein B. E., Gosling G. T., Hoeksema J. T., McComas D. J., Neugebauer M., Sheeley N. R., Wang Y. M. ULYSSES at 50 deg south: Constant immersion in the high-speed solar wind. *Geophys. Res. Lett.* 1994. 21. P. 1105—1108.
25. Phillips J. L., Bame S. J., Feldman W. C., Goldstein B. E., Gosling J. T., Hammond C. M., McComas D. J., Neugebauer M., Scime E. E., Suess S. T. ULYSSES solar wind plasma observations at high southerly latitudes. *Science.* 1995. 268. P. 1030—1033.
26. Richardson I. G., Cane H. V. Near-Earth solar wind flows and related geomagnetic activity during more than four solar cycles. *J. Space Weather and Space Clim.* 2012. 2. P. A02.
27. Schwenn R. Large-scale structure of the interplanetary medium, in: Schwenn R., Marsch E. (Eds), *Physics of the Inner Heliosphere II, Waves and Turbulence.* Springer-Verlag. 1990. P. 98—181.
28. Shishova T. D. The influence of the large-scale inhomogeneities of the interplanetary plasma on the form of temporal spectra of the scintillations. *Sov. Astron.* 1982. 26. P. 731—741.
29. Vitkevich V. V., Vlasov V. I. Radio astronomical investigation of the drift of the inhomogeneous interplanetary plasma. *Sov. Astron.* 1970. 13. P. 669—676.
30. Zakharenko V. V., Konovalenko A. A., Zarka P., Ulyanov O. M., Sidorchuk M. A., Stepkin S. V., Koliadin V. L., Kalinichenko N. N., et al. Digital receivers for low-frequency radio telescopes UTR-2, URAN, GURT. *J. Astron. Instrum.* 2016. 5, N 4. P. 738—749.

Н. Н. Калиниченко¹, М. Р. Оляк¹, А. А. Коноваленко¹,
А. И. Браженко², Н. В. Кугай¹, А. И. Романчук¹

¹Радиоастрономический институт Национальной академии наук Украины,
Харьков, Украина

²Гравиметрическая обсерватория Института геофизики
Национальной академии наук Украины, Полтава, Украина

КРУПНОМАСШТАБНАЯ СТРУКТУРА СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА ЗА ОРБИТОЙ ЗЕМЛИ, РЕКОНСТРУИРОВАННАЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ МЕЖПЛАНЕТНЫХ МЕРЦАНИЙ В ДВУХ ПУНКТАХ НА ДЕКАМЕТРОВЫХ РАДИОВОЛНАХ

Солнечный ветер — это ряд потоков с разными параметрами (скорость, показатель степени спектра неоднородностей, ширина и другие). Бимодальный характер распределения скорости солнечного ветра экспериментально был установлен во время измерений на космических аппаратах. А космический аппарат «Улисс» подтвердил, что бимодальная структура солнечного ветра сохраняется на относительно больших расстояниях от Солнца (в несколько астрономических единиц). Однако есть другой способ восстановления потоковой структуры солнечного ветра — это метод межпланетных мерцаний. Цель работы — реконструкция потоковой структуры солнечного ветра за орбитой Земли с использованием данных наблюдений межпланетных мерцаний в двух пунктах. Эксперименты проводились на декаметровых радиоволнах, поскольку последние довольно сильно рассеиваются разреженной межпланетной плазмой за орбитой Земли. Экспериментальные данные, которые анализируют

ються в этой работе, были получены путем синхронных наблюдений межпланетных мерцаний на радиотелескопах УТР-2 и УРАН-2. Определение параметров солнечного ветра и его крупномасштабной структуры проводилось путем сопоставления экспериментальных кривых (зависимостей скорости гармоник кросс-спектра мерцаний и спектров мощности) с этими же характеристиками, но полученными путем расчетов. Для разделения межпланетных и ионосферных мерцаний использовался спектральный, пространственный и частотный критерии. Результаты этого исследования показывают, что солнечный ветер за орбитой Земли состоит из разных потоков, которые сменяют один другого на луче зрения на источник. Проведенные исследования подтверждают надежность и эффективность метода межпланетных мерцаний при его использовании для реконструкции потоковой структуры солнечного ветра.

Ключевые слова: солнечный ветер, крупномасштабная структура, межпланетные мерцания

*N. N. Kalinichenko¹, M. R. Olyak¹, A. A. Konovalenko¹,
A. I. Brazhenko², N. V. Kuhai¹, A. I. Romanchuk¹*

¹Institute of Radio Astronomy of National Academy of Sciences of Ukraine,
Kharkiv, Ukraine

²Gravimetric Observatory of Geophysical Institute of National Academy
of Sciences of Ukraine, Poltava, Ukraine

LARGE-SCALE STRUCTURE OF SOLAR WIND BEYOND EARTH'S ORBIT RECONSTRUCTED BY USING DATA OF TWO-SITE INTERPLANETARY SCINTILLATION OBSERVATIONS AT DECAMETER RADIOWAVES

The solar wind is a collection of flows with different parameters (speed, spectral index, width and others). Spacecraft measurements were the means that allowed conclusions to be made about the bimodal character of the solar wind. The spacecraft "Ulysses" proved that the bimodal structure is clear at relatively large distances from the Sun (several astronomical units). Also, there is another possibility of the reconstruction of the solar wind stream structure. This is the interplanetary scintillation method. The purpose of the article is to reconstruct the stream structure of the solar wind beyond Earth's orbit with using the data of the two-site interplanetary scintillation observations. The experiments were carried out at decameter wavelengths as they were relatively high scattered by the rarefied interplanetary plasma beyond Earth's orbit. The experimental data that were analyzed in this work was obtained by synchronous interplanetary scintillation observations with the radio telescope UTR-2 and UРАН-2. The determination of the parameters of the solar wind and its stream structure is undertaken by fitting calculated curves for different models to the experimental IPS characteristics (scintillation power spectra and velocities of cross spectrum harmonics). The spectral, spatial and frequency criteria were used to separate the interplanetary and ionospheric scintillations. The results of this investigation show that the solar wind beyond Earth's orbit usually consists of several flows which replace each other on the line of sight to the radio source. These investigations prove reliability and efficiency of the interplanetary scintillation method for the reconstruction of the solar wind stream structure.

Keywords: solar wind, stream structure, interplanetary scintillations.

Статья поступила в редакцию 19.07.2018

После доработки 30.08.2018

Принята к публикации 24.09.2018