

М. М. КАЛІНІЧЕНКО^{1,2}, Н. В. КУГАЙ^{2,1}, О. О. КОНОВАЛЕНКО¹,
А. І. БРАЖЕНКО³, І. М. БУБНОВ¹, С. М. ЄРІН¹, Г. О. РУКЕР⁴,
Ф. ЗАРКА⁵, А. ЛЕКАШО⁵, О. Л. ІВАНТИШИН⁶,
О. О. ЛИТВИНЕНКО¹, О. І. РОМАНЧУК¹, А. В. ФРАНЦУЗЕНКО³

¹Радіоастрономічний інститут НАН України,
вул. Мистецтв, 4, м. Харків, 61002, Україна
E-mail: m.m.kalinichenko.space@gmail.com

²Глухівський національний педагогічний університет ім. О. Довженка,
вул. Києво-Московська, 24, м. Глухів, 41400, Україна

³Полтавська гравіметрична обсерваторія
Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України,
вул. М'ясоєдова, 27/29, м. Полтава, 36014, Україна

⁴Інститут космічних досліджень Австрійської академії наук,
вул. Шмідльштрассе, 6, м. Грац, 8042, Австрія

⁵Лабораторія космічних досліджень і астрофізичного приладобудування,
Паризька обсерваторія, медонський філіал,
пл. Жюль Янсена, 5, Медон, F-92195, Франція

⁶Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України,
вул. Наукова, 5, м. Львів, 79060, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕРЕХТІНЬ РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ КОСМІЧНИХ ДЖЕРЕЛ НА НЕОДНОРІДНОСТЯХ МІЖПЛАНЕТНОЇ ПЛАЗМИ В РАДІОАСТРОНОМІЧНОМУ ІНСТИТУТІ НАН УКРАЇНИ

Присвячується 110-річчю Семена Яковича Брауде
та 50-річчю радіотелескопа УТР-2

Предмет і мета роботи: *Огляд досліджень мерехтінь радіовипромінювання космічних джерел на неоднорідностях міжпланетної плазми, що проводилися в Радіоастрономічному інституті НАН України, починаючи з перших спостережень у середині 70-х років і до наших днів.*

Методи та методологія: *Під час підготовки цієї статті автори оглянули, проаналізували й узагальнили інформацію, яка була опублікована у вітчизняних і закордонних виданнях, доповідалася на наукових конференціях.*

Результати: *Оглянуто дослідження міжпланетних мерехтінь, які проводилися в Радіоастрономічному інституті НАН України. Обговорено в ретроспективі, як в процесі цих досліджень отримувалися знання про основні параметри міжпланетних мерехтінь в декаметровому діапазоні радіохвиль та важливі параметри сонячного вітру і його структури, пропонувалися різноманітні методи обробки та аналізу експериментальних даних, створювалися нові засоби прийому космічного радіовипромінювання. Показано місце і важливість цих досліджень для світової науки.*

Висновки: *За роки, що минули з початку досліджень, колектив Відділення низькочастотної радіоастрономії Радіоастрономічного інституту НАН України отримав низку нових актуальних результатів, які виводять Україну в когорту світових центрів досліджень міжпланетних мерехтінь. Побудова нового радіотелескопа ГУРТ, поміж іншим, створює нові перспективи для розвитку цього актуального напрямку.*

Ключові слова: *міжпланетні мерехтіння, декаметровий діапазон, сонячний вітер, потокова структура сонячного вітру, корональний викид маси*

1. Вступ

Радіоастрономічний інститут Національної академії наук України є головною науковою організацією України в галузі радіоастрономічних досліджень, які включають практично всі напрями радіоастрономії, відомі сучасній науці [1].

Одним з таких напрямів є дослідження мерехтінь радіовипромінювання космічних джерел. Відомо, що розсіяння радіохвиль, результатом якого є мерехтіння, може суттєво обмежувати точність і чутливість радіоастрономічних експериментів. У випадку спостережень космічних джерел середовищами, які розсіюють радіовипромінюван-

ня, є міжзоряна і міжпланетна плазма, а також іоносфера Землі. Слід зазначити, що, з одного боку, ефекти розсіяння у вказаних середовищах обмежують чутливість і точність радіоастрономічних спостережень, а з іншого боку, відкривають унікальну можливість для оцінки параметрів самих плазмових середовищ. Так, дослідження мерехтінь на неоднорідностях міжпланетної плазми дозволяють отримувати інформацію про її параметри: швидкість, спектр неоднорідностей, товщину і кількість потоків міжпланетної плазми (зокрема, і в областях, недоступних для досліджень з космічних апаратів). Спостереження міжпланетних мерехтінь також дають змогу оцінювати кутові розміри самих радіоджерел. При цьому реалізується кутове розділення, еквівалентне роздільній здатності інтерферометра з довжиною бази, яка удвічі-втричі перевищує діаметр орбіти Землі. Очевидність та інформативність методу пояснює той факт, що спостереження міжпланетних мерехтінь незмінно включаються в програми наукових радіоастрономічних проєктів. Наразі працює низка потужних закордонних радіоастрономічних центрів досліджень міжпланетних мерехтінь: Сан Дієго (San Diego), США; Нагоя (Nagoya), Японія; Аберистуїт (Aberystwyth), Велика Британія; Отакамунд (Ootacamund або Ooty), Індія; MEXART, Мексика та Пушино, Росія. З середини 70-х років минулого століття і дотепер міжпланетні мерехтіння активно вивчаються в Радіоастрономічному інституті НАН України.

Ця стаття присвячена огляду досліджень мерехтінь радіовипромінювання космічних джерел на неоднорідностях міжпланетної плазми, які проводилися в Радіоастрономічному інституті НАН України.

2. Міжпланетні мерехтіння

Радіовипромінювання компактних космічних джерел (пульсарів, квазарів, галактик), проходячи крізь, міжпланетну плазму, яка має неоднорідності показника заломлення, зазнає дифракції, внаслідок чого в площині спостерігача на Землі виникають просторові флуктуації інтенсивності радіосигналу (рис. 1). Оскільки міжпланетна плазма як ціле рухається відносно спостерігача, просторові флуктуації інтенсивності виявляють

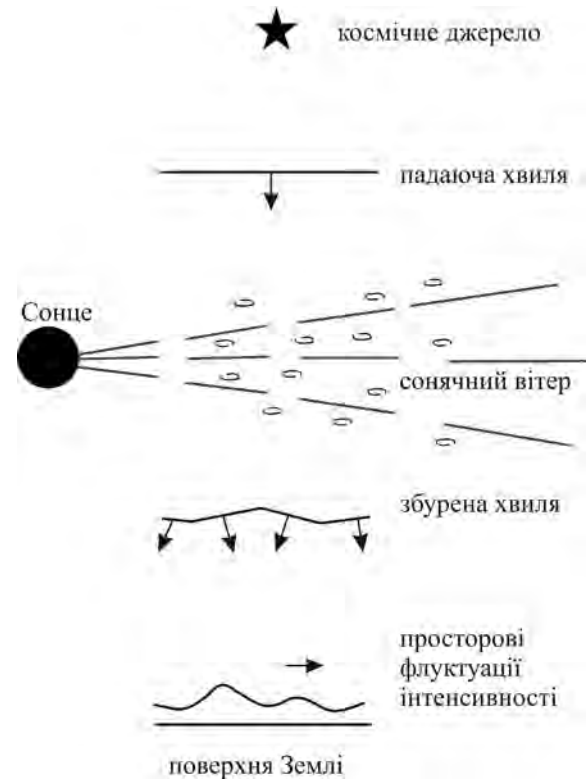


Рис. 1. Явище міжпланетних мерехтінь радіовипромінювання космічних джерел

себе в точці прийому як часові варіації, які зазвичай називають міжпланетними мерехтіннями (interplanetary scintillations або IPS). Тут і далі ми ставимо знак рівності між поняттями “сонячний вітер” і “міжпланетна плазма”, оскільки добре відомо, що лівова частка міжпланетної плазми має саме сонячне походження.

Вперше міжпланетні мерехтіння спостерігалися Ентоні Г'юїшем [2] як швидкі з періодом порядку однієї секунди флуктуації інтенсивності радіосигналу космічних джерел. Було запропоновано кількісно описувати це астрономічне явище величиною флуктуацій інтенсивності відносно середнього рівня:

$$\Delta I(t) = I(t) - \langle I(t) \rangle,$$

де $I(t)$ і $\langle I(t) \rangle$ – інтенсивність випромінювання джерела в момент часу t і середня інтенсивність випромінювання джерела відповідно. При цьому інтенсивність міжпланетних мерехтінь характеризувалася індексом мерехтінь, який є найважливішою статистичною характеристикою, що описує міжпланетні мерехтіння:

$$m = \left(\frac{\langle \Delta I(t)^2 \rangle}{\langle I \rangle^2} \right)^{1/2}.$$

Було встановлено, що інтенсивність міжпланетних мерехтінь залежить від елонгації ε (кута між напрямком на Сонце і напрямком на джерело радіовипромінювання) і довжини хвилі λ . На великих елонгаціях міжпланетні мерехтіння слабкі внаслідок низької електронної концентрації на промені зору. З наближенням променя зору до Сонця міжпланетні мерехтіння посилюються внаслідок збільшення розсіяння на неоднорідностях більш концентрованої міжпланетної плазми, досягають максимуму, а потім поступово слабшають і врешті-решт практично повністю зникають. Елонгація ε_{\max} , на якій спостерігаються максимальні флуктуації інтенсивності сигналу, збільшується з довжиною хвилі (від одиниць градусів на сантиметрових хвилях до $\approx 100^\circ$ на декаметрових). На рис. 2 зображено залежності величини m/m_{\max} від ε , отримані на частотах 2700, 430, 74 МГц [3] та 25 МГц [4].

Проведені у 60–70-х роках минулого століття дослідження [5–7] показали, що квазіперіоди міжпланетних мерехтінь, пропорційні кутовому розміру джерела θ , майже не залежать від λ і залишаються приблизно постійними в широкому діапазоні елонгацій.

Вже в перших роботах першовідкривачів міжпланетних мерехтінь було запропоновано

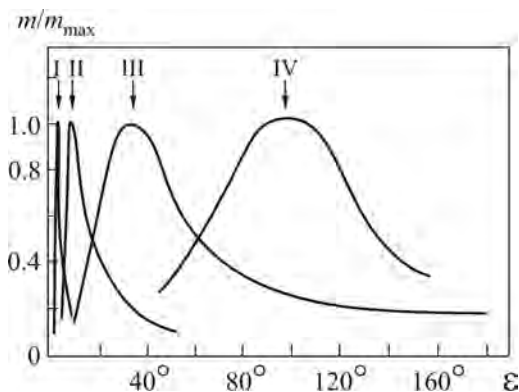


Рис. 2. Залежність індексу мерехтінь від елонгації та частоти спостережень: I – частота 2700 МГц (радіоджерело 3C279), II – 430 МГц (радіоджерело СТА-21), III – 74 МГц (радіоджерело 3C144) [3] та IV – 25 МГц (радіоджерело 3C144) [4]

використовувати дані спостережень для встановлення параметрів сонячного вітру [8] і оцінки кутових розмірів радіоджерел [9]. Відтоді почалися розробки відповідних методик.

Оскільки теоретичні оцінки показували, що міжпланетні мерехтіння мають бути корельованими в пунктах, рознесених на сотні кілометрів, з початку ери досліджень цього явища спостереження здебільшого проводилися синхронно на кількох радіотелескопах. Це надавало можливості оцінювати вектор швидкості руху дифракційної картини на поверхні Землі і відповідно вектор швидкості сонячного вітру. Так, вже в перших спостереженнях міжпланетних мерехтінь Е. Г'юїш використав два радіотелескопи, розташовані на відстані 53 км один від одного. Це дозволило, з одного боку, відкинути можливе іоносферне походження флуктуацій інтенсивності, які спостерігалися, (іоносферні мерехтіння некорельовані на такій базі), а з іншого боку, оцінити швидкість міжпланетної плазми на промені зору ($200 \div 400$ км/с). Під час багатопунктових спостережень міжпланетних мерехтінь було відкрито, що в роки мінімуму сонячної активності швидкий сонячний вітер дме з областей Сонця поблизу полюсів [10]. Це відкриття лише через 27 років було підтверджено *in situ* вимірюваннями на космічному апараті Ulysses [11]. Надалі спостереження міжпланетних мерехтінь з метою оцінки параметрів сонячного вітру набули значного поширення. При цьому зазвичай використовувалося вписування теоретичних залежностей в експериментальні характеристики (спектри мерехтінь [12], кореляційні функції [13–14], дисперсійні залежності [15, 16]). Для оцінки кутових розмірів радіоджерел було запропоновано порівнювати теоретичні й розрахункові залежності індексу мерехтінь від елонгації [17, 18], а також альтернативний метод – аналіз форми спектра мерехтінь [19, 20].

3. Дослідження міжпланетних мерехтінь в Радіоастрономічному інституті НАН України

3.1. Дослідження у 70–80-ті роки минулого століття

Піонерські роботи під керівництвом Е. Г'юїша [2] були виконані на частоті 178 МГц. Пізніше дослідження було розширене в області нижчих

і вищих частот. До середини 70-х років спостереження міжпланетних мерехтінь в декаметровому діапазоні радіохвиль не відомі. Це пояснюється як існуванням потужних негативних факторів (високий рівень перешкод і сильний вплив іоносфери Землі), які заважають проведенню спостережень міжпланетних мерехтінь в декаметровому діапазоні радіохвиль, так і високими вимогами до радіотелескопа (в першу чергу до його чутливості). У світі не існувало іншого радіотелескопа, крім УТР-2, який би дозволив ефективно провести такі спостереження. Між тим, декаметровий діапазон відкриває унікальні можливості для досліджень міжпланетної плазми в усьому діапазоні елонгацій, зокрема і на великих елонгаціях $\epsilon > 90^\circ$, де хвилі з частотами ≥ 100 МГц вже слабо розсіюються розрідженою плазмою. Крім того, оскільки структура космічних джерел залежить від частоти спостережень, визначення її в декаметровому діапазоні радіохвиль та ще й незалежним від інтерферометрії способом має вагомое значення.

Перші спостереження міжпланетних мерехтінь на радіотелескопі УТР-2 Радіоастрономічного інституту НАН України проведено в липні 1975 р. [21] співробітником Фізичного інституту ім. П. М. Лебедева АН СРСР В. С. Артюхом та Б. П. Рябовим, співробітником інституту Радіофізики та електроніки АН УРСР (на базі якого пізніше створено Радіоастрономічний інститут НАН України). Спостереження були ініційовані академіком С. Я. Брауде. За даними експерименту було зроблено оцінку індексу мерехтінь радіоджерел 3С48, 3С273 та 3С295. Під час обговорення, в якому взяли участь відомі фахівці в області досліджень мерехтінь В. І. Шишов та А. В. Пинзарь, було висловлено припущення щодо причини низьких значень індексу мерехтінь, які спостерігалися в експерименті.

Регулярні спостереження міжпланетних мерехтінь на радіотелескопі УТР-2 продовжилися до початку 90-х років минулого століття. Ці дослідження пов'язані з іменами відомих українських вчених В. П. Бовкуна та І. М. Жука, співробітників спочатку Сектора радіоастрономії інституту Радіофізики та електроніки АН УРСР, а потім Радіоастрономічного інституту НАН України. Свої головні результати вони отримали щодо спектрів міжпланетних мерехтінь. Так, було встановлено, що в діапазоні робочих частот

12.6 ÷ 25 МГц спектри міжпланетних мерехтінь характеризуються частотою зрізу фільтра Френеля $\approx 0.035 \div 0.65$ Гц та мають степеневий вид зі значенням спектрального індексу в діапазоні від 3 до 4 [22–24]. Оскільки у випадку іоносферних мерехтінь ці параметри мають значення $\approx 0.007 \div 0.01$ Гц та 3 ÷ 5 відповідно, суттєва різниця в ширинах спектрів дозволяє надійно виокремити міжпланетні мерехтіння за наявності іоносферних, іншими словами, розділити ці два типи мерехтінь [22–24]. Спектри міжпланетних (джерело 3С144) та іоносферних (джерело 3С274) мерехтінь для двох днів спостережень, взяті з роботи [22], наведено на рис. 3, а та 3, б відповідно. Пунктирною лінією позначена границя спектра іоносферних мерехтінь на частоті 0.02 Гц, вище якої їх спектральна густина зменшується на 1–2 порядки.

Було показано також [25], що в цьому частотному діапазоні спектри міжпланетних мерехтінь на елонгаціях $\epsilon > 90^\circ$ можна описати моделлю фазового екрана в наближенні слабких мерехтінь та припущенні степеневого спектра турбулентності. Цей результат В. П. Бовкуна та І. М. Жука ілюструє рис. 4. На рисунку показано експериментальні спектри міжпланетних мерехтінь радіовипромінювання джерела 4С21.53 (суцільна лінія) та радіоджерела 3С144 (штрихова лінія), які спостерігалися на радіотелескопі УТР-2 в 1983 р. на елонгаціях 128° та 118° відповідно. Штрихпунктирними лініями побудовано розрахунок спектра мерехтінь радіовипромінювання джерела з кутовими розмірами $1.4''$ та $2.6''$ в моделі тонкого фазового екрана, розташованого на відстані 1 а. о. від спостерігача, для швидкості сонячного вітру 270 км/с в припущенні степеневого спектра турбулентності з показником степеня 3.5.

Слід зазначити, що на частотах ≥ 100 МГц використання моделі фазового екрана [26, 27] на той час вже стало традиційним, що пояснюється простим математичним апаратом, наочністю та хорошим опрацюванням, які притаманні цій моделі.

У результаті чималої роботи було визначено також основні параметри (спектральну густину потоку випромінювання, кутовий розмір, частку потоку випромінювання компоненти, яка виявляє мерехтіння, або верхню межу на цей потік) 25 радіоджерел, які мерехтять, і 26 джерел,

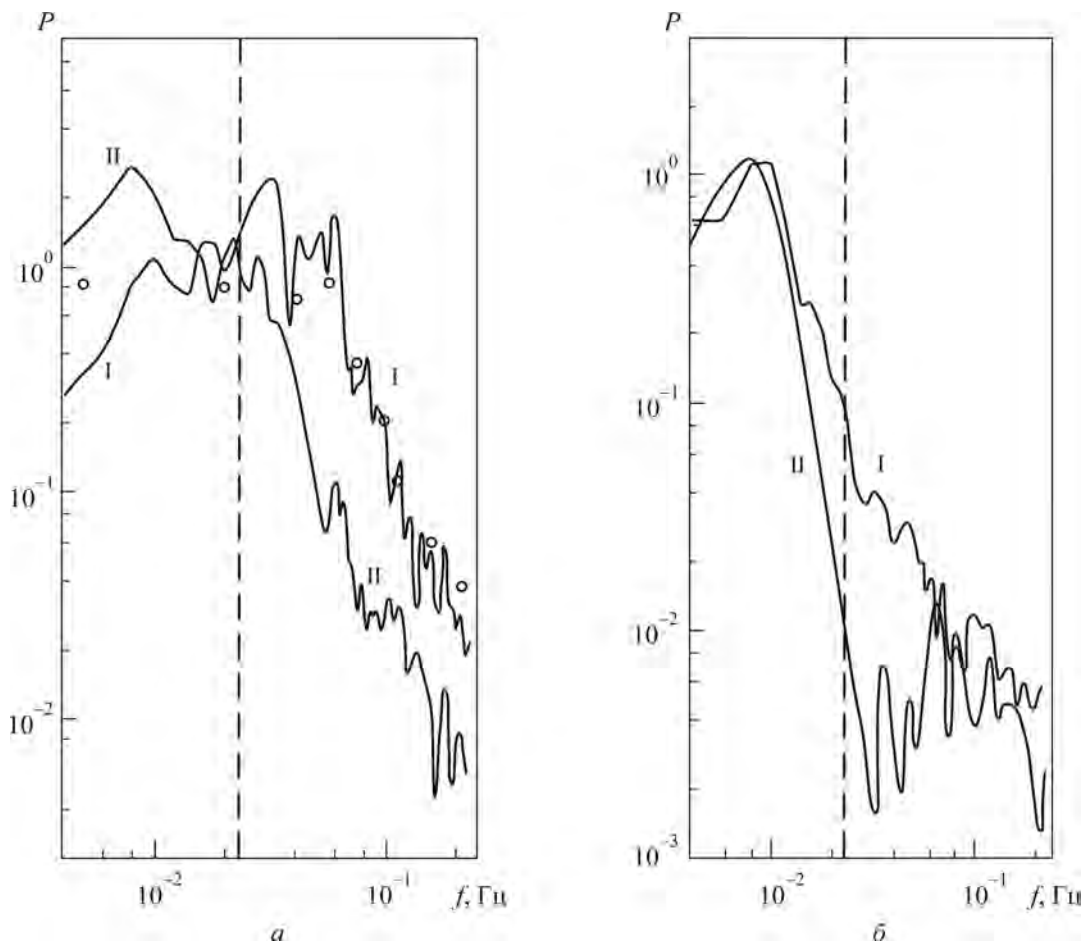


Рис. 3. Спектри міжпланетних (а) та іоносферних (б) мерехтіннь. Римськими цифрами позначено різні дні спостережень (взято з роботи В. П. Бовкуна та І. М. Жука [22])

які мерехтіння на міжпланетній плазмі не виявляють [25, 28–30]. Особливої уваги приділялося радіоджерелам 3С144, 3С461 (Касіопея А) та 4С21.53, які є потужними залишками спалахів наднових (ЗСН). Цікавою була дискусія про можливу наявність компактного джерела радіовипромінювання в ЗСН Касіопея А [31, 32]. Зазначимо, що новітні спостереження міжпланетних мерехтіннь, проведені М. М. Калініченком, [33] показали відсутність компактного джерела в декаметровому діапазоні радіохвиль з кутовими розмірами $< 5''$ в цьому ЗСН. Ці результати узгоджуються з даними спостережень в оптичному та інфрачервоному діапазонах [34]. Точкове джерело рентгенівських променів, виявлене в ЗСН Касіопея А, ймовірно, є радіотихою нейтронною зорею, яка повільно обертається [35]. Після досліджень, проведених В. П. Бовкуном та І. М. Жуком, стало зрозумілим, що джерела в декаметровому діапазоні радіохвиль внаслідок

міжзоряного розсіяння мають кутові розміри $\geq 1''$, а кількість радіоджерел з кутовими розмірами $< 5''$ (які принципово можуть виявляти мерехтіння на неоднорідностях міжпланетної плазми) є дуже обмеженою.

3.2. Багатопунктові широкосмугові спостереження міжпланетних мерехтіннь у 2000-ні роки

Через суб'єктивні причини регулярні спостереження міжпланетних мерехтіннь на радіотелескопі УТР-2 не проводилися в 90-ті роки минулого століття і були поновлені за пропозицією академіка О. О. Коноваленка лише на початку ХХІ століття. Для цього у Відділенні низькочастотної радіоастрономії Радіоастрономічного інституту НАН України було створено нову наукову групу, в яку ввійшли І. С. Фалькович, М. М. Калініченко та А. О. Гридін. Згодом до досліджень між-

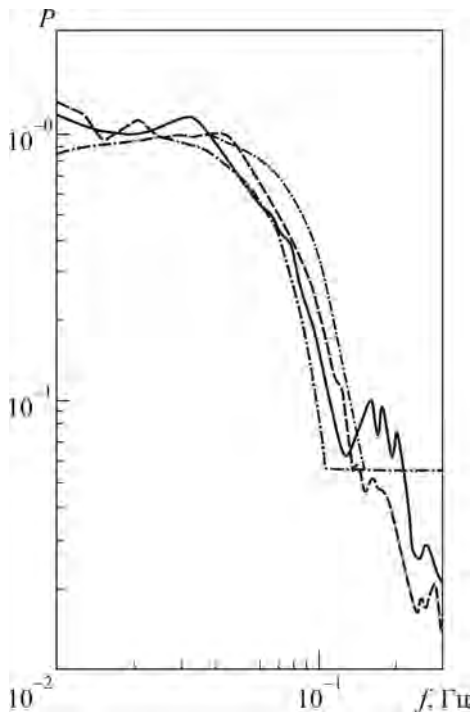


Рис. 4. Експериментальні спектри міжпланетних мерехтінь радіовипромінювання джерела 4C21.53 (суцільна лінія) та джерела 3C144 (штрихова лінія), штрихпунктирні лінії – розрахунок спектра мерехтінь радіовипромінювання джерела з кутовими розмірами 1.4" та 2.6" в моделі тонкого фазового екрана (взято з роботи В. П. Бовкуна та І. М. Жука [25])

планетних мерехтінь долучалися в різний час М. Р. Оляк, І. М. Бубнов, В. В. Соловйов, С. М. Єрін, О. І. Романчук та Н. В. Кугай. На цьому етапі досліджень міжпланетних мерехтінь було впроваджено два основних нововведення: розширено смугу частот приймання та зроблено перехід до багатопунктових спостережень.

Пояснимо важливість першого нововведення на прикладі. Однією з важливих задач, для розв'язку якої можливо використати метод міжпланетних мерехтінь, є встановлення спектра міжпланетної турбулентності за асимптотичною степенною частиною експериментального спектра мерехтінь. В процесі розв'язування цієї задачі використовується той факт, що спектральні індекси у першого і другого спектра в моделі фазового екрана просто відрізняються на одиницю. Спектр мерехтінь виходить на асимптотичну степенну частину, коли потужність падає на 1÷1.5 порядків. Тому, щоб правильно оцінити нахил експериментального спектра мерехтінь, а за ним – нахил спектра турбулентності,

перший спектр слід виміряти мінімум в діапазоні двох, а краще, більше порядків за потужністю. Прості оцінки показують, що для цього смуга частот приймання повинна бути близько 1 МГц і більше при типових потоках радіоджерел (100 ÷ 200 Ян) й параметрах спектра мерехтінь (обговорювалися раніше), значення індексу мерехтінь $m = 0.1 \div 0.3$, ефективній площі радіотелескопа УТР-2 $A_{eff} = 1.5 \cdot 10^5 \text{ м}^2$. Щоб задовольнити вказану вище вимогу високої чутливості спостережень, під керівництвом І. С. Фальковича і за активної участі співробітників Радіоастрономічного інституту А. О. Гридін та І. М. Бубнова для радіотелескопів УТР-2 (Харків) та УРАН-2 (Полтава) були розроблені й виготовлені 3- та 16-канальний приймачі зі смугою пропускання близько 1 МГц кожен [36, 37]. В подальшому широкосмугові приймачі добре зарекомендували себе під час спостережень міжпланетних мерехтінь на великих елонгаціях від Сонця, тобто в нічних умовах. Високі характеристики сконструйованих приймачів ілюструються, наприклад, тим фактом, що з допомогою 3-канального широкосмугового приймача вдалося вперше з поверхні Землі зареєструвати радіовипромінювання, пов'язане з блискавками на Сатурні (Saturn Electrostatic Discharges) [38].

Недоліком приймачів з суцільною широкою смугою пропускання була неможливість їх роботи в умовах високого рівня перешкод, що є поширеним в декаметровому діапазоні радіохвиль. Тому впровадження нового цифрового спектрального аналізатора DSP-z [39] зробило справжню революцію у спостереженнях міжпланетних мерехтінь в декаметровому діапазоні радіохвиль. Цей широкосмуговий ($\Delta f = 32 \text{ МГц}$) цифровий приймач має великий динамічний діапазон (понад 70 дБ) і дозволяє шляхом перетворення Фур'є прийнятого сигналу отримати до 8192 окремих каналів з частотним розділенням 4 кГц. На наступному етапі обробки даних канали, вражені перешкодами, можуть бути виявлені і видалені, а вільні від перешкод канали просумовані для отримання широкої ефективної смуги приймання. Використання DSP-z уможливило спостереження міжпланетних мерехтінь за наявності великої кількості перешкод, наприклад, вдень і влітку. На початок 2021 р. три радіотелескопи – УТР-2 (Харків), УРАН-2 (Полтава)

та УРАН-3 (Львів) – оснащено цифровими спектральними аналізаторами DSP-z [1].

Відносно другого нововведення слід сказати наступне. Починаючи з 2006 р. спостереження міжпланетних мерехтінь космічних радіоджерел в Радіоастрономічному інституті проводяться синхронно на двох радіотелескопах УТР-2 (Харків) та УРАН-2 (Полтава). Якщо наукова задача того вимагає, періодично до вимірювань долучаються радіотелескопи УРАН-3 (Львів) та УРАН-4 (Одеса). На рис. 5, взятому з роботи [40], показано динамічні спектри мерехтінь радіоджерела 3С144, зареєстровані синхронно на радіотелескопах УТР-2 та УРАН-2 з допомогою цифрових спектральних аналізаторів DSP-z, а також перерізи цих динамічних спектрів на частоті 25 МГц. Хоча флуктуації інтенсивності сигналу на двох радіотелескопах (рис. 5, а) неідентичні, все ж помітна їх схожість з урахуванням деякого зміщення у часі. За пропозицією М. М. Калініченка висока просторова кореляція стала головним критерієм виокремлення реалізацій міжпланетних мерехтінь, вільних від перешкод і сильного викривлення іоносферою Землі [41]. Слід зазначити, що факт високої просторової кореляції міжпланетних мерехтінь був відомий давно, але у випадку декаметрових радіохвиль був доведений і почав використовуватися саме з цього часу.

З початку 90-х років минулого століття, після багатьох років спостережень сонячного вітру, стало загальноприйнятим фактом, що сонячний вітер складається з двох компонент: повільних потоків з швидкістю близько 350 км/с та швидких потоків з швидкістю близько 750 км/с (див., наприклад, [42, 43]). 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. В періоди максимуму сонячної активності ситуація складніша – Сонячна система наповнена повільним сонячним вітром з вузькими потоками швидкого сонячного вітру, який витікає з корональних дір на різних сонячних широтах. В періоди максимуму сонячної активності також частішають випадки корональних викидів маси (КВМ, Coronal Mass Ejection (CME)). КВМ – гігантські хмари сонячної речовини (масою близько $10^{13} \div 10^{15}$ кг) і магнітного поля, що вики-

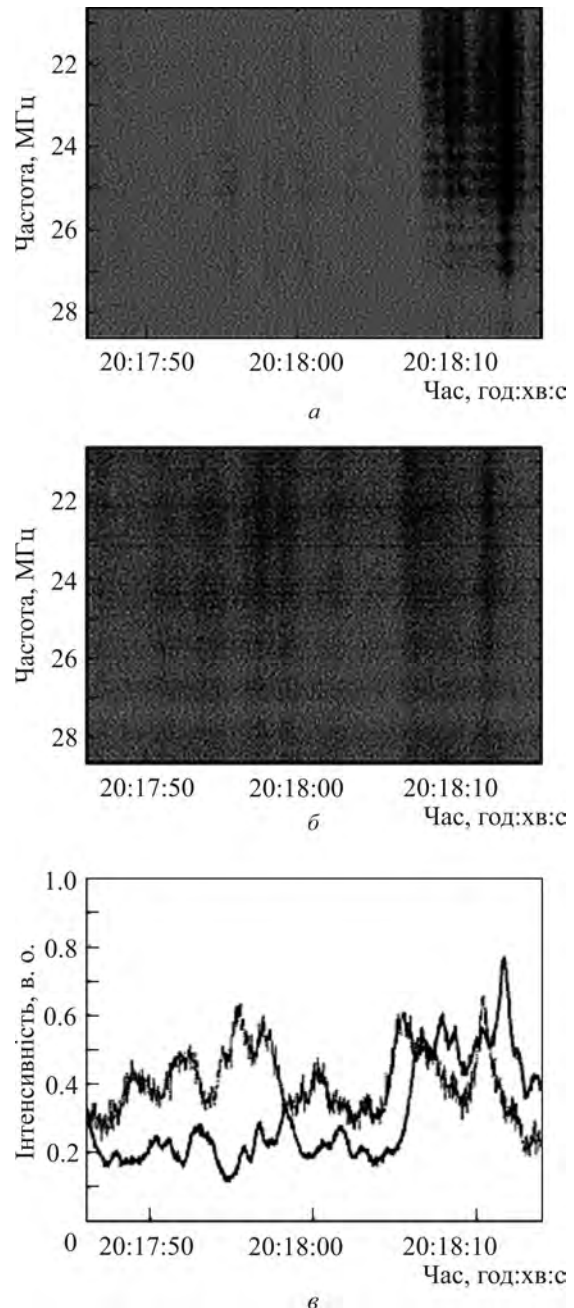


Рис. 5. Динамічні спектри міжпланетних мерехтінь, синхронно отримані на радіотелескопах УТР-2 (а), УРАН-2 (б) та перерізи цих динамічних спектрів на частоті 25 МГц (в) [40]

даються вибуховим шляхом (початкова швидкість до 2000 км/с) з атмосфери Сонця в результаті активних процесів [44]. Опинившись в міжпланетному просторі, КВМ порушують структуру сонячного вітру і в разі руху в бік Землі можуть призводити до збурень земної магнітосфери. КВМ, разом з сонячними спалахами, відіграють визначальну роль у формуванні космічної

погоди, а тому у науковій спільноті сформувався стійкий інтерес до вивчення КВМ.

У процесі досліджень, проведених М. М. Калініченком, О. О. Коноваленком, А. І. Браженком та В. В. Соловйовим, була показана можливість виявлення КВМ у міжпланетному просторі за даними міжпланетних мерехтінь у декаметровому діапазоні радіохвиль. На рис. 6, взятому з роботи [45], наведено, як приклад, динамічні спектри міжпланетних мерехтінь та їх перерізи на частоті 25 МГц до (рис. 6, а та в) та в момент проходження КВМ (рис. 6, б та г) через промінь зору на одне з джерел радіовипромінювання. Видно, що ефект є досить помітним.

На рис. 7, взятому з роботи [45], показано варіації характеристик мерехтінь і параметрів сонячного вітру в період проходження КВМ Дня Валентина. Чітко видно, що індекс мерехтінь та ширина спектра мерехтінь добре корелюють з концентрацією протонів та швидкістю сонячного вітру відповідно. Різке збільшення індексу мерехтінь на 49-й день 2011 р. (рис. 7, а) пов'язане з появою КВМ на промені зору на радіоджерело.

Варіації ширини спектра мерехтінь (рис. 7, б) в період спостережень викликані зміною швидкості сонячного вітру (рис. 7, г).

Було показано також, що моделювання КВМ у міжпланетному просторі тонким розсіюючим шаром є вдалим підходом у випадку моделювання його динаміки, оскільки область стиснення, розташована між тілом КВМ та ударною хвилею, компактна і має значно більшу концентрацію (рис. 7, в), ніж оточуючий незбурений сонячний вітер. Однак модель фазового екрана не дає можливості оцінити, наприклад, ширину чи розподіл часток в потоці сонячного вітру, а тому у разі потреби слід застосовувати моделі, які враховують протяжність розсіюючого середовища (наприклад, метод плавних збурень [46] або метод інтегралів вздовж траєкторій [47, 48]).

Перехід до багатопунктових спостережень мав подвійну користь. По-перше, він дозволив реалізувати просторовий критерій розділення міжпланетних та іоносферних мерехтінь, що підвищило надійність радіоастрономічних експериментів (про це мова йшла вище). По-друге,

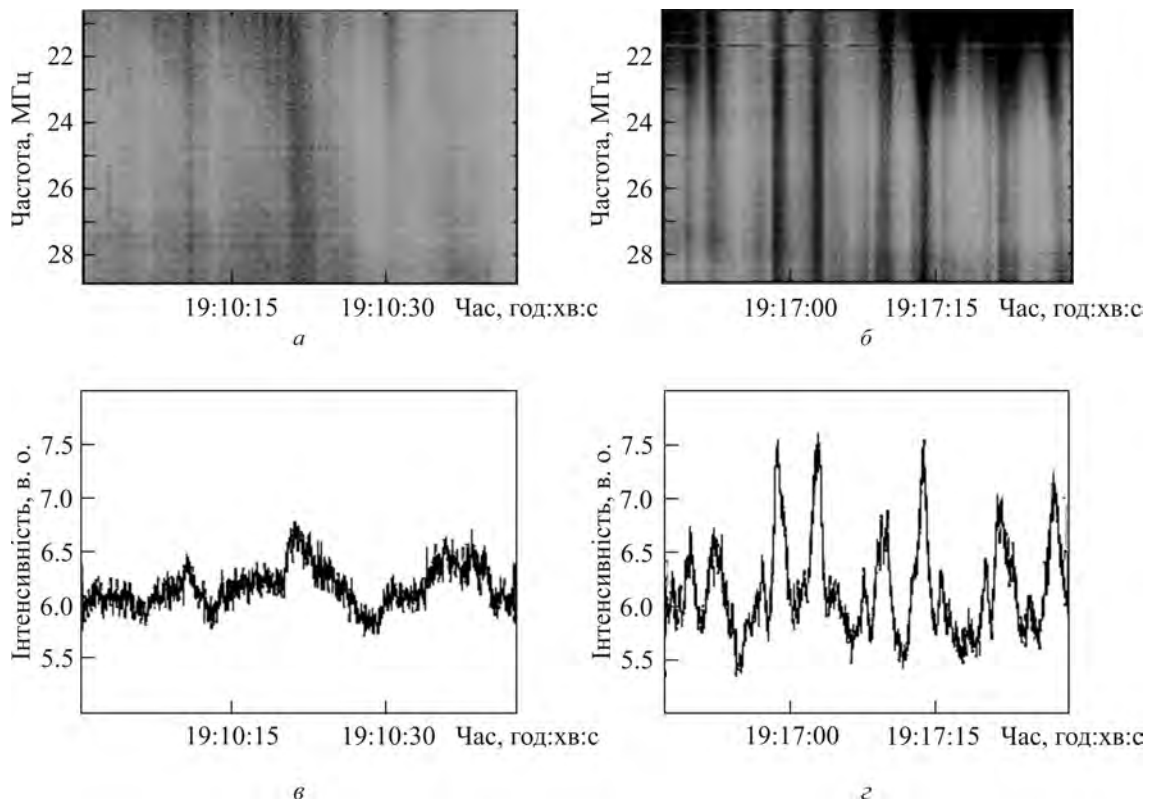


Рис. 6. Динамічні спектри мерехтінь та їх перерізи на частоті 25 МГц до (а, в) і в момент проходження КВМ (б, г) через промінь зору на джерело космічного радіовипромінювання 15 лютого 2011 р. (КВМ Дня Валентина, Valentine's Day SME)

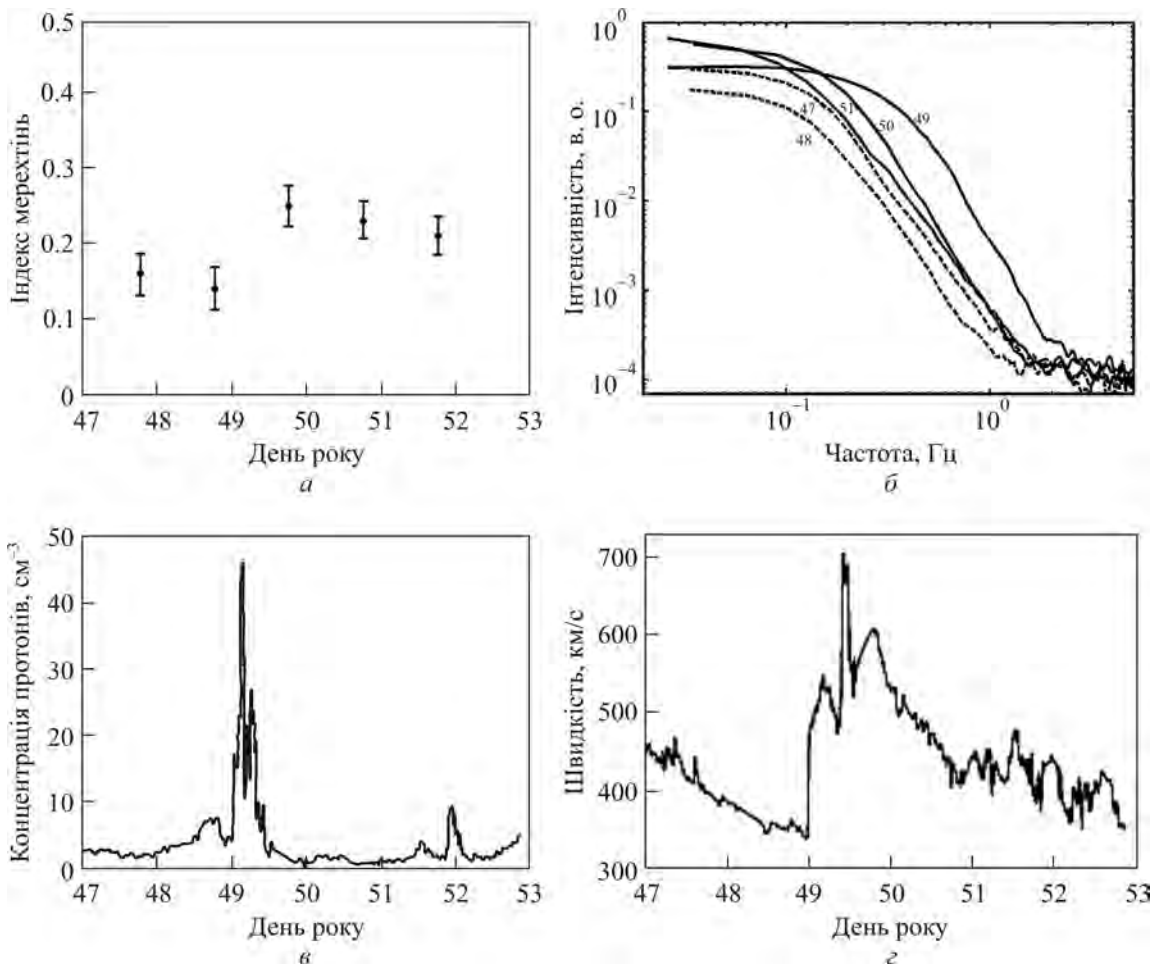


Рис. 7. Індеси (а) і спектри (б) мерехтін, отримані методом міжпланетних мерехтін (радіотелескоп УТР-2), та зміни концентрації протонів (в) і швидкості сонячного вітру (г), виміряні на орбіті Землі космічним апаратом Wind. Дані космічного апарата Wind взяті з бази даних OMNI NASA/GSFC на сторінці OMNIWeb (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov>)

стало можливим аналізувати не тільки спектри, а ще й крос-кореляційну функцію мерехтін в двох пунктах. Для цього використовувався метод дисперсійного аналізу. Суть методу полягає в дослідженні фази крос-спектру мерехтін, який можна отримати шляхом перетворення Фур'є крос-кореляційної функції мерехтін у двох пунктах. Уперше метод дисперсійного аналізу був запропонований в 1965 р. Д. А. Джонсом і А. Д. Модом у зв'язку з вивченням іоносферних дрейфів [49]. А. Н. Лотова та І. В. Чашей запропонували для визначення параметрів сонячного вітру аналізувати дисперсійну залежність, яку можливо отримати з використанням фази крос-спектру мерехтін [16, 50]. Співробітниця Радіоастрономічного інституту НАН України М. Р. Оляк створила методику визначення па-

раметрів сонячного вітру шляхом сумісного аналізу спектрів і дисперсійних залежностей міжпланетних мерехтін [51]. В цій методиці в експериментальні характеристики вписувалися теоретичні залежності, які розраховувалися методом інтегралів уздовж траєкторій. Описана вище методика дозволила встановлювати поточкову структуру сонячного вітру з використанням даних синхронних спостережень міжпланетних мерехтін, записаних на радіотелескопах УТР-2 та УРАН-2, в декаметровому діапазоні радіохвиль (рис. 8) [40].

Слід також згадати новітню роботу В. А. Шепелева, О. О. Литвиненка, К. Георгієвої та Б. Кірова [53], опубліковану в 2020 р. В цій роботі на основі аналізу даних спостережень, отриманих на інтерферометрі УТР-2 – УРАН-2, було оціне-

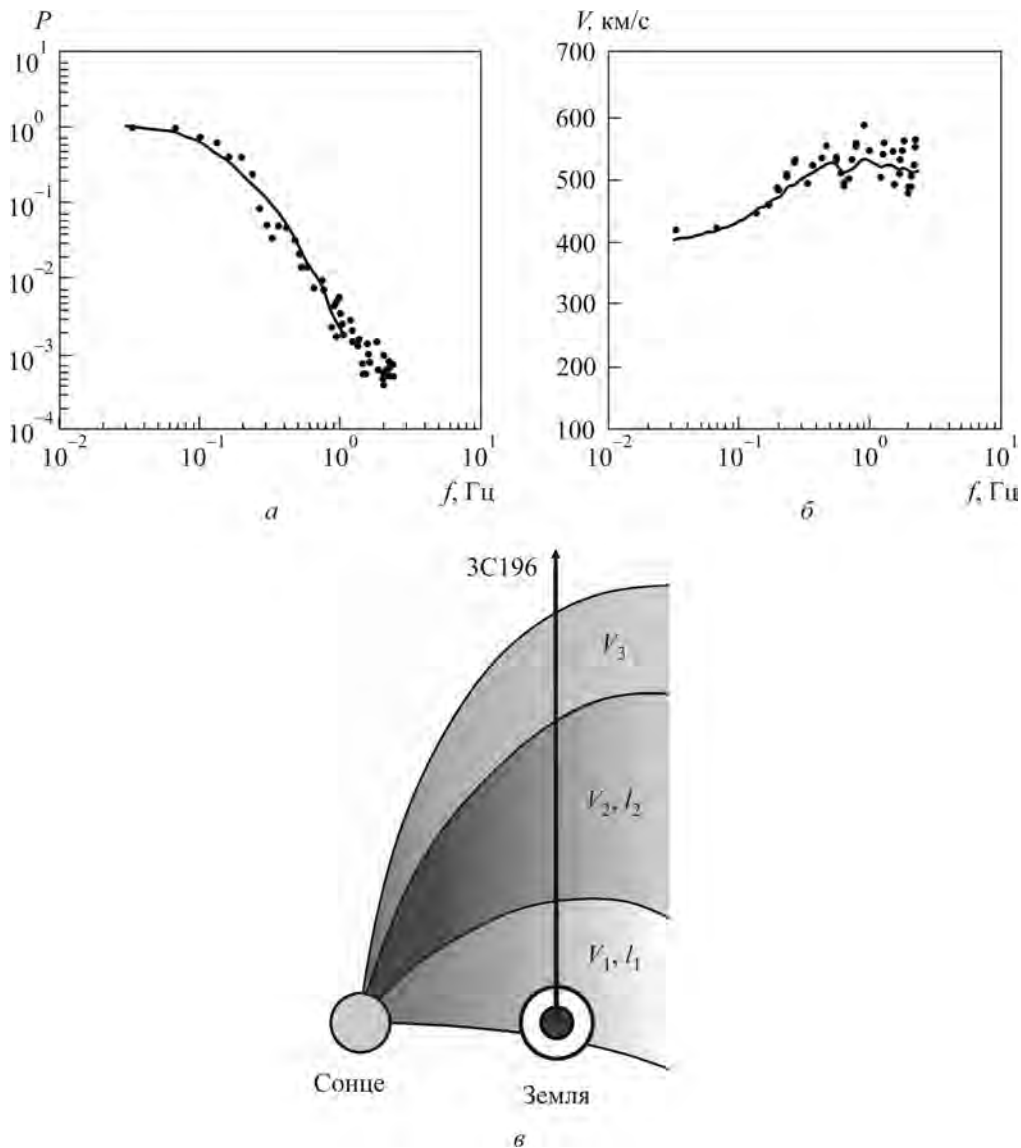


Рис. 8. Вписування теоретичних залежностей (суцільні лінії) в експериментальні дані (точки): *а* – спектри, *б* – дисперсійні залежності, *в* – реконструкція потокової структури сонячного вітру на промені зору на радіоджерело за сумісним аналізом спектра (*а*) та дисперсійної залежності (*б*). (Рисунок з роботи [52])

но ступінь впливу міжпланетних мерехтінь на інтерферометричні спостереження та виявлено підвищення турбулентності міжпланетного середовища за орбітою Землі тривалістю до кількох діб, пов'язане з проявами спорадичної активності Сонця. Загалом результати синхронних багатопунктових та інтерферометричних спостережень добре узгоджуються.

Як обговорювалося раніше, для інтерпретації даних спостережень міжпланетних мерехтінь в декаметровому діапазоні радіохвиль застосовувались модель фазового екрану та метод інтегралів уздовж траєкторій. Існує і третя модель –

метод плавних збурень [46], яка принципово може бути застосована в цьому випадку. Виникає логічне запитання – яка з моделей адекватніше описує міжпланетні мерехтіння в декаметровому діапазоні радіохвиль? Дискусія з цього питання мала місце в Радіоастрономічному інституті досить довгий час. В останні роки Н. В. Кугай та М. М. Калініченко проаналізували цю проблему [54]. Було оцінено умови застосовності вказаних моделей. З оцінки випливає, що всі три методи: метод плавних збурень, метод інтегралів уздовж траєкторій, метод фазового екрану (із застереженням) – можуть бути застосовані

для моделювання слабких міжпланетних мерехтінь радіовипромінювання космічних радіоджерел в діапазоні $8 \div 80$ МГц. Застереження для моделі фазового екрану полягає в наступному. Модель тонкого фазового екрану можна застосовувати у цьому випадку, якщо зі збільшенням відстані від спостерігача на Землі розмір зони Френеля збільшується повільніше, ніж внутрішній масштаб турбулентності (в цьому випадку основний вклад в мерехтіння буде вносити шар плазми, розташований на відстані приблизно 1 а. о.). Слід зазначити, що наразі поведінка внутрішнього масштабу турбулентності на великих відстанях від Сонця ще не до кінця встановлена. Розрахунки спектрів мерехтінь також показали, що зазначені вище методи дають близькі результати, а існуючі відмінності знаходяться в основному в межах існуючих натепер експериментальних похибок. Таким чином, визначити найбільш адекватну модель для цієї задачі можна буде з підвищенням точності вимірювання характеристик мерехтінь.

4. Перспективи досліджень міжпланетних мерехтінь в Радіоастрономічному інституті НАН України

Перспективи досліджень міжпланетних мерехтінь в Радіоастрономічному інституті НАН України вбачаються в постановці нових актуаль-

них задач, що вимагає серед іншого подальшого розширення смуги частот, що приймаються, залучення більшої кількості радіотелескопів і поглиблення кооперації з існуючими закордонними науковими центрами. Розширення смуги частот стає можливим із введенням в експлуатацію нового Гігантського українського радіотелескопа (ГУРТ), який дозволяє проводити спостереження в діапазоні робочих частот $8 \div 80$ МГц. Станом на кінець 2020 р. на радіотелескопі ГУРТ проведено три тестові сесії спостережень джерела 3C144, яке має компактну компоненту з найбільшим потоком випромінювання в декаметровому діапазоні радіохвиль (приблизно 1000 Ян). Тестові експерименти показали, що у випадку проведення спостережень на двох секціях радіотелескопа ГУРТ міжпланетні мерехтіння реєструються (рис. 9, а), але з невеликим відношенням сигнал/шум (рис. 9, б), що не дозволяє із вже звичною для таких досліджень точністю визначати, наприклад, параметри сонячного вітру, навіть застосовуючи сумування сигналу в усьому діапазоні робочих частот. Потрібно використовувати більшу кількість секцій для підвищення чутливості експерименту. Це стане можливим після введення в експлуатацію системи фазування секцій радіотелескопа ГУРТ.

В останні роки були проведені тестові синхронні спостереження мерехтінь із залученням радіотелескопів РТ-32 (Золочів, Україна) та РТ-32 (Вентспілс, Латвія). Перспективними є також

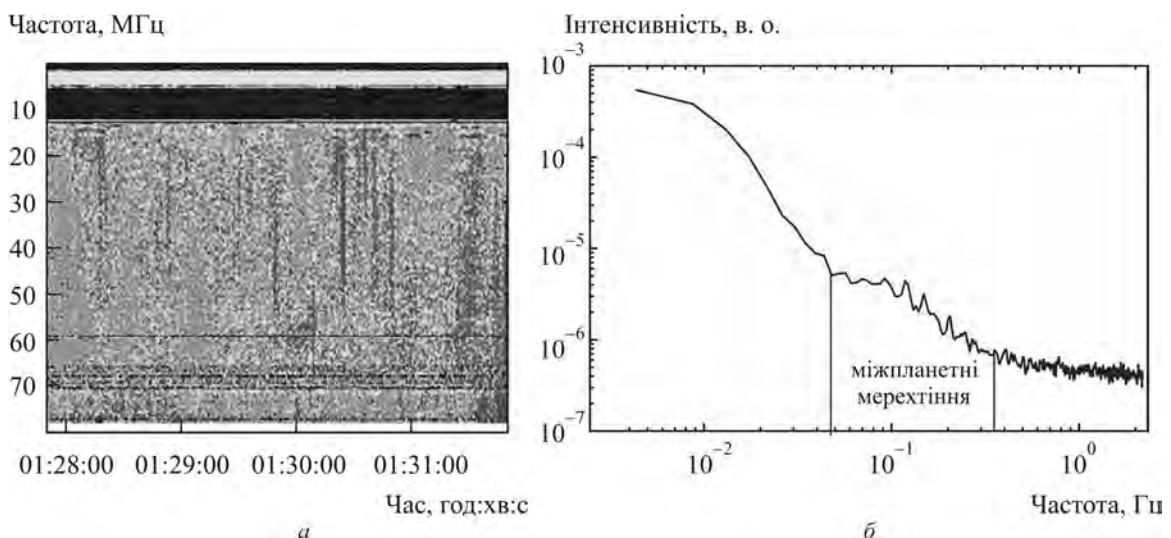


Рис. 9. Динамічний спектр (а) та спектр мерехтінь (б), отримані за даними спостережень джерела 3C144 на радіотелескопі ГУРТ

синхронізація із спостереженнями на радіоінтерферометрі LOFAR та розширення міжнародної співпраці.

5. Висновки

Підсумовуючи викладене вище, можна сказати, що за роки, що минули з початку досліджень, колективом Відділення низькочастотної радіоастрономії Радіоастрономічного інституту НАН України отримано низку нових актуальних результатів, які виводять Україну в когорту світових центрів досліджень міжпланетних мерехтінь. Серед цих результатів слід вказати встановлення основних параметрів міжпланетних мерехтінь в декаметровому діапазоні радіохвиль, розробку і впровадження методів розділення міжпланетних та іоносферних мерехтінь, розробку методів реконструкції потокової структури сонячного вітру та виявлення високошвидкісних потоків сонячного вітру та інші. Цим можна пишатися, беручи до уваги той факт, що починаючи з 90-х років минулого століття має місце постійне недофінансування Радіоастрономічного інституту, внаслідок чого кількість співробітників, які одночасно активно займалися цією важливою науковою тематикою, в жоден період часу не перевищувала трьох чоловік, а зазвичай була навіть меншою! В глобальному ж сенсі слід визнати, що наразі метод міжпланетних мерехтінь залишається таким же затребуваним і ефективним, яким був напочатку, понад 50 років тому, коли він був сформульований Ентоні Г'юїшем та іншими першопрохідцями в цій науковій області.

Описані дослідження виконувалися в рамках держбюджетних тем НАН України “Радіовипромінювання Всесвіту у декаметровому діапазоні хвиль”, “Дослідження сонячної корони радіоастрономічними методами на декаметрових хвилях”, “Розробка та впровадження елементів і систем великих декаметрових антен”, конкурсної договірної науково-дослідницької роботи “Нові горизонти вітчизняної та міжнародної низькочастотної радіоастрономії”, Цільової комплексної програми НАН України “Інструментальне та інформаційне приєднання радіотелескопів УТР-2, УРАН, ГУРТ до світових мереж низькочастотної радіоастрономії”, а також Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2018–2022 рр. (проект “Наземний

супровід системою низькочастотних радіотелескопів УТР-2 – УРАН – ГУРТ міжнародних та українських космічних місій”).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Konovalenko A., Sodin L., Zakharenko V., Zarka P., Ulyanov O., Sidorchuk M., Stepkin S., Tokarsky P., Melnik V., Kalinichenko N., Stanislavsky A., Koliadin V., Shepelev V., Dorovskyy V., Ryabov V., Koval A., Bubnov I., Yerin S., Gridin A., Kulishenko V., Reznichenko A., Bortsov V., Lisachenko V., Reznik A., Kvasov G., Mukha D., Litvinenko G., Khristenko A., Shevchenko V. V., Shevchenko V. A., Belov A., Rudavin E., Vasylieva I., Miroshnichenko A., Vasilenko N., Olyak M., Mylostna K., Skoryk A., Shevtsova A., Plakhov M., Kravtsov I., Volvach Y., Lytvinenko O., Shevchuk N., Zhouk I., Bovkun V., Antonov A., Vavriv D., Vinogradov V., Kozhin R., Kravtsov A., Bulakh E., Kuzin A., Vasilyev A., Brazhenko A., Vashchishin R., Pylaev O., Koshovyy V., Lozinsky A., Ivantyshein O., Rucker H. O., Panchenko M., Fischer G., Lecacheux A., Denis L., Coffre A., Griefmeier J.-M., Tagger M., Girard J., Charrier D., Briand C., and Mann G. The modern radio astronomy network in Ukraine: UTR-2, URAN and GURT. *Exp. Astron.* 2016. Vol. 42, Is. 1. P. 11–48. DOI: 10.1007/s10686-016-9498-x
2. Hewish A., Scott P. F., and Wills D. Interplanetary scintillations of small diameter radio sources. *Nature.* 1964. Vol. 203, No. 4951. P. 1214–1217. DOI: 10.1038/2031214a0
3. Erskine F. T., Cronyn W. M., Shawhan S. D., Roelof E. C., and Gotwols B. L. Interplanetary Scintillation at Large Elongation Angles: Response to Solar Wind Density Structure. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 1978. Vol. 83, Is. A9. P. 4153–4164. DOI: 10.1029/JA083iA09p04153
4. Жук И. Н. Исследование угловой структуры космических источников методом мерцаний. *Известия вузов. Радиофизика.* 1980. Т. 23, № 8. С. 893–918.
5. Cohen M. H. High-resolution observations of radio sources. *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 1969. Vol. 7, Is. 1. P. 619–664. DOI: 10.1146/annurev.aa.07.090169.003155
6. Лотова Н. А. Радиоастрономические исследования неоднородной структуры околосолнечной плазмы. *Успехи физических наук.* 1968. Т. 95, № 3. С. 293–312.
7. Jokipii J. R. Turbulence and Scintillations in the Interplanetary Plasma. *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 1973. Vol. 11. P. 1–28. DOI: 10.1146/annurev.aa.11.090173.000245
8. 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
9. Little L. T. and Hewish A. Interplanetary Scintillation and its Relation to the Angular Structure of Radio Sources. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 1966. Vol. 134, Is. 3. P. 221–237. DOI: 10.1093/mnras/134.3.221
10. Dennison P. A. and Hewish A. The Solar Wind outside the Plane of the Ecliptic. *Nature.* 1967. Vol. 213, No. 5074. P. 343–346. DOI: 10.1038/213343a0
11. Phillips J. L., Balogh A., Bame S. J., Goldstein B. E., Gosling J. T., Hoeksema J. T., McComas D. J., Neugebauer M., Sheeley N. R., and Wang Y.-M. ULYSSES at 50° south:

- constant immersion in the high-speed solar wind. *Geophys. Res. Lett.* 1994. Vol. 21, Is. 12. P. 1105–1108. DOI: 10.1029/94GL01065
12. 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, Is. 4. P. 691–695.
 13. Виткевич В. В., Власов В. И. Радиоастрономические исследования дрейфа неоднородной межпланетной плазмы. *Астрономический журнал.* 1969. Т. 46, № 4. С. 851–861.
 14. Ekers R. D. and Little L. T. The Motion of the Solar Wind Close to the Sun. *Astron. Astrophys.* 1971. Vol. 10. P. 310–316.
 15. Golley M. G. and Dennison P. A. Dispersion analysis of interplanetary scintillation. *Planet. Space Sci.* 1970. Vol. 18, Is. 1. P. 95–101. DOI: 10.1016/0032-0633(70)90069-3
 16. Лотова Н. А., Чашей И. В. Распределение скоростей в межпланетной среде по наблюдениям мерцаний. *Геомагнетизм и аэронавигация.* 1978. Т. 18, № 5. С. 809–817.
 17. Readhead A. C. S. Interplanetary Scintillation of Radio Sources at Metre Wavelengths – II: Theory. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 1971. Vol. 155, Is. 2. P. 185–197. DOI: 10.1093/mnras/155.2.185
 18. Spangler S. R. and Meyers K. A. Frequency dependence of compact structure in extended extragalactic radio sources. *Astron. J.* 1978. Vol. 83, Is. 6. P. 547–559.
 19. Алексеев И. А., Илясов Ю. П., Кутузов С. М., Хрупова Г. А., Шишов В. И., Шишова Т. Д. Влияние размеров радиоисточников на временные спектры межпланетных мерцаний. *Письма в Астрономический журнал.* 1976. Т. 2, № 3. С. 160–165.
 20. Шишов В. И., Шишова Т. Д. Влияние размеров источника на спектры межпланетных мерцаний. Наблюдения. *Астрономический журнал.* 1979. Т. 56, № 3. С. 613–622.
 21. Артюх В. С., Рябов Б. П. Наблюдения мерцаний ЗС48, ЗС273 и ЗС295 на частоте 25 МГц. *Астрономический журнал.* 1977. Т. 54, № 5. С. 953–956.
 22. 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. Сер. А.* 1981. № 6. С. 69–71.
 23. Bovkoon V. P. and Zhouck I. N. Scintillations of cosmic radio sources in the decameter waveband. I. Spectra of scintillations due to ionospheric and interplanetary plasma fluctuations and the possibility of their separation. *Astrophys. Space Sci.* 1981. Vol. 79. P. 165–180. DOI: 10.1007/BF00655914
 24. Бовкун В. П., Жук И. Н. Спектр турбулентности и скорость солнечного ветра на элонгациях 90–150 градусов. *Известия вузов. Радиофизика.* 1982. Т. 25, №7. С. 727–733.
 25. Бовкун В. П., Жук И. Н. Тонкая структура радиоисточка 4С21.53 на декаметровых волнах. *Астрономический журнал.* 1984. Т. 61, № 6. С. 1108–1112.
 26. Salpeter E. E. Interplanetary Scintillations. I. Theory. *Astrophys. J.* 1967. Vol. 147, No. 2. P. 433–448. DOI: 10.1086/149027
 27. 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.
 28. Бовкун В. П., Жук И. Н., Мень А. В. Структура источников ЗС196 и ЗС280. *Письма в Астрономический журнал.* 1981. Т. 7, №6. С. 347–351.
 29. Бовкун В. П., Жук И. Н., Соболев Я. М. Низкочастотный компактный источник в Крабовидной туманности. *Астрономический журнал.* 1987. Т. 64, № 4. С. 734–742.
 30. 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.
 31. Бовкун В. П., Жук И. Н. Наблюдения мерцаний компактных источников в Крабовидной туманности и Кассиопее А в декаметровом диапазоне радиоволн. *Доклады АН УССР, Серия А.* 1981. №7. С. 57–60.
 32. Bovkoon V. P., Braude S. Ya., and Megn A. V. Observations of Cassiopeia A at 20 and 25 MHz with the URAN-1 interferometer. *Astrophys. Space Sci.* 1982. Vol. 81, Is. 1-2. P. 221–230. DOI: 10.1007/BF00676147
 33. Kalinichenko N. N. A search for compact radio sources in supernova remnants using the interplanetary scintillation technique. *Astrophys. Space Sci.* 2009. Vol. 319, Is. 2. P. 131–138. DOI: 10.1007/s10509-008-9960-y
 34. Fesen R. A., Pavlov G. G., and Sanwal D. Near-infrared and optical limits for the central X-ray point source in the Cassiopeia A supernova remnant. *Astrophys. J.* 2006. Vol. 636, No. 2. P. 848–858. DOI: 10.1086/498087
 35. Chakrabarty D., Pivovarov M. J., Hernquist L. E., Heyl J. S., and Narayan R. The central X-ray point source in Cassiopeia A. *Astrophys. J.* 2001. Vol. 548, No. 2. P. 800–810. DOI: 10.1086/318994
 36. 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.
 37. 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.
 38. Konovalenko A. A., Kalinichenko N. N., Rucker H. O., Lecacheux A., Fischer G., Zarka P., Zakharenko V. V., Mylostna K. Y., Griesmeier J.-M., Abranin E. P., Falkovich I. S., Sidorchuk K. M., Kurth W. S., Kaiser M. L., and Gurnett D. A. Earliest recorded ground-based decameter wavelength observations of Saturn's lightning during the giant E-storm detected by Cassini spacecraft in early 2006. *Icarus.* 2013. Vol. 224, Is. 1. P. 14–23. DOI: 10.1016/j.icarus.2012.07.024
 39. Zakharenko V., Konovalenko A., Zarka P., Ulyanov O., Sidorchuk M., Stepkin S., Koliadin V., Kalinichenko N., Stanislavsky A., Dorovskyy V., Shepelev V., Bubnov I., Yerin S., Melnik V., Koval A., Shevchuk N., Vasylieva V., Mylostna K., Shevtsova A., Skoryk A., Kravtsov I., Volvach Y., Plakhov M., Vasilenko N., Vasylykivskiy Y., Vavriv D., Vinogradov V., Kozhin R., Kravtsov A., Bulakh E., Kuzin A., Vasilyev A., Ryabov V., Reznichenko A., Bortsov V., Lisachenko V., Kvasov G., Mukha D., Litvinenko G., Brazhenko A., Vashchishin R., Pylaev O., Koshovyy V., Lozinsky A., Ivantyshyn O., Rucker H. O., Panchenko M., Fischer G., Lecacheux A., Denis L., Coffre A., and Griesmeier J.-M. Digital Receivers for Low-Frequency Radio Tele-

- scopes UTR-2, URAN, GURT. *J. Astron. Instrum.* 2016. Vol. 5, No. 4. id. 1641010. DOI: 10.1142/S2251171716410105
40. Kalinichenko N. N., Olyak M. R., Konovalenko A. A., Brazenko A. I., Kuhai N. V., and Romanchuk A. I. Large-Scale Structure of Solar Wind beyond the Earth's Orbit: Reconstruction Using the Data of Two-Site Measurements of Interplanetary Scintillations in the Decameter Radio Range. *Kinemat. Phys. Celest. Bodies.* 2019. Vol. 35, No. 1. P. 17–27. DOI: 10.3103/S0884591319010033
41. Калиниченко Н. Н., Фалькович И. С., Коноваленко А. А., Браженко А. И. Разделение межпланетных и ионосферных мерцаний космических источников в декаметровом диапазоне радиоволн. *Радиофізика и радіоастрономія.* 2013. Т. 18, № 3. С. 210–219.
42. Schwenn R. Large-Scale Structure of the Interplanetary Medium. In: R. Schwenn and E. Marsch, eds. *Physics of the Inner Heliosphere. Physics and Chemistry in Space, Space and Solar Physics, vol 20.* Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1990. P. 99–181. DOI: 10.1007/978-3-642-75361-9_3
43. Coles W. A. A bimodal model of the solar wind speed. *Astrophys. Space Sci.* 1996. Vol. 243, Is. 1. P. 87–96. DOI: 10.1007/BF00644037
44. Brueckner G. E. The Behaviour of the Outer Solar Corona ($3R_{\odot}$ to $10R_{\odot}$) during a Large Solar Flare Observed from OSO-7 in White Light. In: G. Newkirk, ed. *Coronal Disturbances. International Astronomical Union.* vol. 54. Dordrecht: Springer, 1974. P. 333–334. DOI: 10.1007/978-94-010-2257-6_35
45. 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. *Радиофізика и радіоастрономія.* 2013. Т. 18, № 4. С. 301–308.
46. Рытов С. М., Кравцов Ю. А., Татарский В. И. *Введение в статистическую радиофизику. Часть II. Случайные поля.* Под ред. С. М. Рытова. Москва: Наука, 1978. 464 с.
47. Feynman R. P. and Hibbs A. R. *Quantum Mechanics and Path Integrals.* New York: McGraw-Hill Companies, Inc., 1965. 365 p.
48. Dashen R. Path Integrals for Waves in Random Media. *J. Math. Phys.* 1979. Vol. 20, Is. 5. P. 894–920. DOI: 10.1063/1.524138
49. Jones D. and Maude A. D. Evidence for Wave Motions in the E-Region in the Ionosphere. *Nature.* 1965. Vol. 206, No. 4980. P. 177–179. DOI: 10.1038/206177b0
50. Лотова Н. А. Радиоастрономические исследования струйной структуры солнечного ветра. *Итоги науки и техники, сер. "Астрономия".* 1988. Т. 33. С. 121–149.
51. 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. DOI: 10.1016/j.jastp.2013.05.016
52. Калініченко М. М., Оляк М. Р., Коноваленко О. О., Бубнов І. М., Єрін С. М., Браженко А. І., Івантишин О. Л., Литвиненко О. О. Дослідження сонячного вітру шляхом спостережень міжпланетних мерехтінь космічних радіоджерел у декаметровому діапазоні радіохвиль. *Радиофізика и радіоастрономія.* 2017. Т. 22, № 1. С. 45–52. DOI: 10.15407/rpra22.01.045
53. Шепелев В. А., Литвиненко О. А., Георгиева К., Киров Б. Влияние солнечного ветра на интерферометрические наблюдения в декаметровом диапазоне. *Радиофізика и радиоастрономія.* 2020. Т. 25, № 2. С. 87–99. DOI: 10.15407/rpra25.02.087
54. Кугай Н. В., Калініченко М. М. Щодо питання вибору моделі слабких міжпланетних мерехтінь радіовипромінювання космічних джерел в діапазоні 8–80 МГц. *Радиофізика и радиоастрономія.* 2019. Т. 24, № 2. С. 117–128. DOI: 10.15407/rpra24.02.117

REFERENCES

- KONOVALENKO, A., SODIN, L., ZAKHARENKO, V., ZARKA, P., ULYANOV, O., SIDORCHUK, M., STEP-KIN, S., TOKARSKY, P., MELNIK, V., KALINICHENKO, N., STANISLAVSKY, A., KOLIADIN, V., SHEPELEV, V., DOROVSKYY, V., RYABOV, V., KOVAL, A., BUBNOV, I., YERIN, S., GRIDIN A., KULISHENKO, V., REZNICHENKO, A., BORTSOV, V., LISACHENKO, V., REZNIK, A., KVASOV, G., MUKHA, D., LITVINENKO, G., KRISTENKO, A., SHEVCHENKO, V. V., SHEVCHENKO, V. A., BELOV, A., RUDAVIN, E., VASYLIEVA, I., MIROSHNICHENKO, A., VASILENKO, N., OLYAK, M., MYLOSTNA, K., SKORYK, A., SHEVTSOVA, A., PLAKHOV, M., KRAVTSOV, I., VOLVACH, Y., LYTVINENKO, O., SHEVCHUK, N., ZHOUK, I., BOVKUN, V., ANTONOV, A., VAVRIV, D., VINOGRADOV, V., KOZHIN, R., KRAVTSOV, A., BULAKH, E., KUZIN, A., VASILYEV, A., BRAZHENKO, A., VASHCHISHIN, R., PYLAEV, O., KOSHOVYY, V., LOZINSKY, A., IVANTYSHIN, O., RUCKER, H. O., PANCHENKO, M., FISCHER, G., LECACHEUX, A., DENIS, L., COFFRE, A., GRIEBMEIER, J.-M., TAGGER, M., GIRARD, J., CHARRIER, D., BRIAND, C. and MANN, G., 2016. The modern radio astronomy network in Ukraine: UTR-2, URAN and GURT. *Exp. Astron.* vol. 42, is. 1, pp. 11–48. DOI: 10.1007/s10686-016-9498-x
- HEWISH, A., SCOTT, P. F. and WILLS, D., 1964. Interplanetary scintillations of small diameter radio sources. *Nature.* vol. 203, no. 4951, pp. 1214–1217. DOI: 10.1038/2031214a0
- ERSKINE, F. T., CRONYN, W. M., SHAWHAN, S. D., ROELOF, E. C. and GOTWOLS, B. L., 1978. Interplanetary scintillation at large elongation angles: Response to solar wind density structure. *J. Geophys. Res. Space Phys.* vol. 83, is. A9, pp. 4153–4164. DOI: 10.1029/JA083iA09p04153
- ZHUK, I. N., 1980. Scintillation studies of cosmic source angular structure (Review). *Radiophys. Quantum Electron.* vol. 23, no. 8, pp. 597–615. DOI: 10.1007/BF01041203
- COHEN, M. H., 1969. High-resolution observations of radio sources. *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* vol. 7, is. 1, pp. 619–664. DOI: 10.1146/annurev.aa.07.090169.003155
- LOTOVA, N. A., 1968. Radio astronomical investigations of the inhomogeneous structure of the near-solar plasma. *Sov. Phys. Usp.* vol. 11, is. 3, pp. 424–434. DOI: 10.1070/PU-1968v011n03ABEH003945
- JOKIPII, J. R., 1973. Turbulence and Scintillations in the Interplanetary Plasma. *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* vol. 11, pp. 1–28. DOI: 10.1146/annurev.aa.11.090173.000245
- HEWISH, A., DENNISON, P. A. and PILKINGTON, J. D. H., 1966. Measurements of the Size and Motion of the Irregulari-

- ties in the Interplanetary Medium. *Nature*. vol. 209, no. 5029, pp. 1188–1189. DOI: 10.1038/2091188a0
9. LITTLE, L. T. and HEWISH, A., 1966. Interplanetary Scintillation and its Relation to the Angular Structure of Radio Sources. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* vol. 134, is. 3, pp. 221–237. DOI: 10.1093/mnras/134.3.221
 10. DENNISON, P. A. and HEWISH, A., 1967. The Solar Wind outside the Plane of the Ecliptic. *Nature*. vol. 213, no. 5074, pp. 343–346. DOI: 10.1038/213343a0
 11. PHILLIPS, J. L., BALOGH, A., BAME, S. J., GOLDSTEIN, B. E., GOSLING, J. T., HOEKSEMA, J. T., MCCOMAS, D. J., NEUGEBAUER, M., SHEELEY, N. R. and WANG, Y.-M., 1994. ULYSSES at 50° south: constant immersion in the high-speed solar wind. *Geophys. Res. Lett.* vol. 21, is. 12, pp. 1105–1108. DOI: 10.1029/94GL01065
 12. MANOHARAN, P. K. and ANANTHAKRISHNAN, S., 1990. Determination of solar-wind velocities using single-station measurements of interplanetary scintillations. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* vol. 244, is. 4, pp. 691–695.
 13. VITKEVICH, V. V. and VLASOV, V. I., 1970. Radioastronomical investigations of the drift of the inhomogeneous interplanetary plasma. *Sov. Astron.* vol. 13, no. 4, pp. 669–676.
 14. EKBERS, R. D. and LITTLE, L. T., 1971. The Motion of the Solar Wind Close to the Sun. *Astron. Astrophys.* vol. 10, pp. 310–316.
 15. GOLLEY, M. G. and DENNISON, P. A., 1970. Dispersion analysis of interplanetary scintillation. *Planet. Space Sci.* vol. 18, is. 1, pp. 95–101. DOI: 10.1016/0032-0633(70)90069-3
 16. LOTOVA, N. A. and CHASHEI, I. V., 1978. Velocity distribution in the interplanetary medium from observations of scintillations. *Geomagnetizm i Aeronomiia*. vol. 18, no. 5, pp. 809–817. (in Russian).
 17. READHEAD, A. C. S., 1971. Interplanetary Scintillation of Radio Sources at Metre Wavelengths – II: Theory. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* vol. 155, is. 2, pp. 185–197. DOI: 10.1093/mnras/155.2.185
 18. SPANGLER, S. R. and MEYERS, K. A., 1978. Frequency dependence of compact structure in extended extragalactic radio sources. *Astron. J.* vol. 83, is. 6, pp. 547–559.
 19. ALEKSEEV, I. A., ILIASOV, YU. P., KUTUZOV, S. M., KHRUPOVA, G. A., SHISHOV, V. I. and SHISHOVA, T. D., 1976. Influence of dimensions of radio sources on the form of temporal spectra of interplanetary scintillations. *Sov. Astron. Lett.* vol. 2, no. 3, pp. 160–165.
 20. SHISHOV, V. I. and SHISHOVA, T. D., 1979. Influence of source sizes on the spectra of interplanetary scintillations. Observations. *Sov. Astron.* vol. 23, no. 3, pp. 345–350.
 21. ARTYUKH, V. S. and RYABOV, B. P., 1977. Scintillation of 3C 48, 3C 273 and 3C 295 at 25 MHz. *Sov. Astron.* vol. 21, no. 5, pp. 540–542.
 22. BOVKOON, V. P. and ZHOUCK, I. N., 1981. Spectra of scintillations due to ionospheric and interplanetary plasma inhomogeneities and a possibility of their separation in the decametric wave range. *Doklady AN USSR. Ser. A*. no. 6, pp. 69–71. (in Russian).
 23. BOVKOON, V. P. and ZHOUCK, I. N., 1981. Scintillations of cosmic radio sources in the decameter waveband. I. Spectra of scintillations due to ionospheric and interplanetary plasma fluctuations and the possibility of their separation. *Astrophys. Space Sci.* vol. 79, pp. 165–180. DOI: 10.1007/BF00655914
 24. BOVKUN, V. P. and ZHUK, I. N., 1982. Solar-wind turbulence spectrum and velocity at elongations of 90–150°. *Radiophys. Quantum Electron.* vol. 25, is. 7, pp. 513–518. DOI: 10.1007/BF01040222
 25. BOVKOON, V. P. and ZHOUCK, I. N., 1984. Fine structure of the radio source 4C 21.53 in the decameter waveband. *Sov. Astron.* vol. 28, no. 6, pp. 648–651.
 26. SALPETER, E. E., 1967. Interplanetary Scintillations. I. Theory. *Astrophys. J.* vol. 147, no. 2, pp. 433–448. DOI: 10.1086/149027
 27. CRONYN, W. M., 1970. The Analysis of Radio Scattering and Space-Probe Observations of Small-Scale Structure in the Interplanetary Medium. *Astrophys. J.* vol. 161, pp. 755–763.
 28. BOVKUN, V. P., ZHUK, I. N. and MEN, A. V., 1981. The Structure of the Radio Sources 3C196 and 3C280. *Sov. Astron. Lett.* vol. 7, no. 3, pp. 192–194.
 29. BOVKUN, V. P., ZHUK, I. N. and SOBOLEV, YA. M., 1987. The Low-Frequency Compact Source in the Crab Nebula. *Sov. Astron.* vol. 31, no. 4, pp. 385–388.
 30. BOVKOON, V. P. and ZHOUCK, I. N., 1992. Scintillation of cosmic sources in the decameter radio-wave range on inhomogeneities of the interplanetary plasma and the ionosphere. *Kosmicheskaya Nauka i Tekhnika*. vol. 7, no. 7, pp. 80–91. (in Russian).
 31. BOVKOON, V. P. and ZHOUCK, I. N., 1981. Observations of compact source scintillations in the Crab Nebula and CAS A in the decameter range. *Doklady AN USSR. Seriya A*. no. 7, pp. 57–60. (in Russian).
 32. BOVKOON, V. P., BRAUDE, S. YA. and MEGN, A. V., 1982. Observations of Cassiopeia A at 20 and 25 MHz with the URAN-1 interferometer. *Astrophys. Space Sci.* vol. 81, is. 1-2, pp. 221–230. DOI: 10.1007/BF00676147
 33. KALINICHENKO, N. N., 2009. A search for compact radio sources in supernova remnants using the interplanetary scintillation technique. *Astrophys. Space Sci.* vol. 319, no. 2, pp. 131–138. DOI: 10.1007/s10509-008-9960-y
 34. FESEN, R. A., PAVLOV, G. G. and SANWAL, D. 2006. Near-infrared and optical limits for the central X-ray point source in the Cassiopeia A supernova remnant. *Astrophys. J.* vol. 636, is. 2, pp. 848–858. DOI: 10.1086/498087
 35. CHAKRABARTY, D., PIVOVAROFF, M. J., HERNQUIST, L. E., HEYL, J. S. and NARAYAN, R., 2001. The central X-ray point source in Cassiopeia A. *Astrophys. J.* vol. 548, no. 2, pp. 800–810. DOI: 10.1086/31899
 36. 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).
 37. FALKOVICH, I. S., GRIDIN, A. A., KALINICHENKO, N. N. and BUBNOV, I. N., 2005. Sixteen-Band Correlation Radiometer for IPS Observations. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 10, no. 4, pp. 392–397. (in Russian).
 38. KONOVALENKO, A. A., KALINICHENKO, N. N., RUCKER, H. O., LECACHEUX, A., FISCHER, G., ZARKA, P., ZAKHARENKO, V. V., MYLOSTNA, K. Y., GRIEBMEIER, J.-M., ABRANIN, E. P., FALKOVICH, I. S., SIDORCHUK, K. M., KURTH, W. S., KAISER, M. L. and GURNETT, D. A., 2013. Earliest recorded

- ground-based decameter wavelength observations of Saturn's lightning during the giant E-storm detected by Cassini spacecraft in early 2006. *Icarus*. vol. 224, is. 1, pp. 14–23. DOI: 10.1016/j.icarus.2012.07.024
39. ZAKHARENKO, V., KONOVALENKO, A., ZARKA, P., ULYANOV, O., SIDORCHUK, M., STEPKIN, S., KO-LIADIN, V., KALINICHENKO, N., STANISLAVSKY, A., DOROVSKYY, V., SHEPELEV, V., BUBNOV, I., YERIN, S., MELNIK, V., KOVAL, A., SHEVCHUK, N., VASYLIEVA, V., MYLOSTNA, K., SHEVTSOVA, A., SKORYK, A., KRAVTSOV, I., VOLVACH, Y., PLAKHOV, M., VASILENKO, N., VASYLKIVSKYI, Y., VAVRIV, D., VINOGRADOV, V., KOZHIN, R., KRAVTSOV, A., BULAKH, E., KUZIN, A., VASILYEV, A., RYABOV, V., REZNICHENKO, A., BORTSOV, V., LISACHENKO, V., KVASOV, G., MUKHA, D., LITVINENKO, G., BRAZHENKO, A., VASHCHISHIN, R., PYLAEV, O., KOSHOVYY, V., LOZINSKY, A., IVANTYSHYN, O., RUCKER, H. O., PANCHENKO, M., FISCHER, G., LECACHEUX, A., DENIS, L., COFFRE, A. and GRIEBMEIER J.-M., 2016. Digital Receivers for Low-Frequency Radio Telescopes UTR-2, URAN, GURT. *J. Astron. Instrum.* vol. 5, no. 4, id. 1641010. DOI: 10.1142/S2251171716410105
40. KALINICHENKO, N. N., OLYAK, M. R., KONOVALENKO, A. A., BRAZHENKO, A. I., KUHAJ, N. V. and ROMANCHUK, A. I., 2019. Large-Scale Structure of Solar Wind beyond the Earth's Orbit: Reconstruction Using the Data of Two-Site Measurements of Interplanetary Scintillations in the Decameter Radio Range. *Kinemat. Phys. Celest. Bodies*. vol. 35, no. 1, pp. 17–27. DOI: 10.3103/S0884591319010033
41. KALINICHENKO, N. N., FALKOVICH, I. S., KONOVALENKO, O. O. and BRAZHENKO, A. I., 2013. Separation of Interplanetary and Ionospheric Scintillations of Cosmic Sources at Decameter Wavelengths. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 18, no. 3, pp. 210–219. (in Russian).
42. SCHWENN, R., 1990. Large-Scale Structure of the Interplanetary Medium. In: R. SCHWENN and E. MARSCH, eds. *Physics of the Inner Heliosphere. Physics and Chemistry in Space, Space and Solar Physics, vol 20*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, pp. 99–181. DOI: 10.1007/978-3-642-75361-9_3
43. COLES, W. A., 1996. A bimodal model of the solar wind speed. *Astrophys. Space Sci.* vol. 243, is. 1, pp. 87–96. DOI: 10.1007/BF00644037
44. BRUECKNER, G. E., 1974. The Behaviour of the Outer Solar Corona ($3R_{\odot}$ to $10R_{\odot}$) during a Large Solar Flare Observed from OSO-7 in White Light. In: G. NEWKIRK, ed. *Coronal Disturbances. International Astronomical Union*. vol. 54. Dordrecht: Springer, pp. 333–334. DOI: 10.1007/978-94-010-2257-6_35
45. KALINICHENKO, N. N., KONOVALENKO, O. O., BRAZHENKO, A. I. and SOLOV'EV, V. V., 2013. 2011 February 15 CME in the Interplanetary Medium by Observations of Radio Source Scintillations at the Decameter Wavelengths. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 18, no. 4, pp. 301–308. (in Russian).
46. RYTOV, S. M. (ed.), KRAVTSOV, YU. A. and TATARS-KII, V. I., 1978. *Principles of statistical radiophysics. Vol. II. Random fields*. Moscow, Russia: Nauka Publ. (in Russian).
47. FEYNMAN, R. P. and HIBBS, A. R., 1965. *Quantum Mechanics and Path Integrals*. New York: McGraw-Hill Companies, Inc.
48. DASHEN, R., 1979. Path Integrals for Waves in Random Media. *J. Math. Phys.* vol. 20, is. 5, pp. 894–920. DOI: 10.1063/1.524138
49. JONES, D. and MAUDE, A. D., 1965. Evidence for Wave Motions in the E-Region in the Ionosphere. *Nature*. vol. 206, no. 4980, pp. 177–179. DOI: 10.1038/206177b0
50. LOTOVA, N. A., 1988. Radio astronomical investigations of the solar wind stream structure. *Itogi Nauki i Tekhniki, ser. Astronomiya*. vol. 33, pp. 121–149. (in Russian).
51. OLYAK, M. R., 2013. The dispersion analysis of drift velocity in the study of solar wind flows. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* vol. 102, pp. 185–191. DOI: 10.1016/j.jastp.2013.05.016
52. KALINICHENKO, N. N., OLYAK, M. R., KONOVALENKO, O. O., BUBNOV, I. N., YERIN, S. N., BRAZHENKO, A. I., IVANTISHIN, O. L. and LYTVYNNENKO, O. A., 2017. Solar Wind Investigations by Observations of Interplanetary Scintillations of Cosmic Radio Sources at Decameter Wavelengths. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 22, no. 1, pp. 45–52. (in Ukrainian). DOI: 10.15407/rpra22.01.045
53. SHEPELEV, V. O., LITVINENKO, O. O., GEORGI-EVA, K. and KIROV, B., 2020. Influence of the Solar Wind on Interferometric Observations at the Decameter Wavelengths. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 25, no. 2, pp. 87–99. (in Russian). DOI: 10.15407/rpra25.02.087
54. KUHAJ, N. V. and KALINICHENKO, N. N., 2019. To the Question of Choosing the Model of Weak Interplanetary Scintillations of Cosmic Sources Radioemission in Range from 8 to 80 MHz. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 24, no. 2, pp. 117–128. (in Ukrainian). DOI: 10.15407/rpra24.02.117
- M. M. Kalinichenko*^{1,2}, *N. V. Kuhai*^{2,1}, *O. O. Konovalenko*¹, *A. I. Brazhenko*³, *I. M. Bubnov*¹, *S. M. Yerin*¹, *H. O. Rucker*⁴, *P. Zarka*⁵, *A. Lecacheux*⁵, *O. L. Ivantyshyn*⁶, *O. O. Lytvynenko*¹, *O. I. Romanchuk*¹, and *A. V. Frantsuzenko*³
- ¹ Institute of Radio Astronomy, National Academy of Sciences of Ukraine, 4, Mystetstv St., Kharkiv, 61002, Ukraine
- ² Oleksandr Dovzhenko Hlukhiv National Pedagogical University, 24, Kyivo-Moskovska St., Hlukhiv, 41400, Ukraine
- ³ Poltava Gravimetric Observatory, S. Subbotin Institute of Geophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, 27/29, Miasoiedov St., Poltava, 36014, Ukraine
- ⁴ Institut für Weltraumforschung, Österreichischen Akademie der Wissenschaften, 6, Schmiedlstraße, Graz, 8042, Austria
- ⁵ LESIA, Observatoire de Paris, CNRS, PSL/SU/UPMC/UPD/SPC, 5, Place Jules Janssen, Meudon, F-92195, France

⁶ Karpenko Physiko-Mechanical Institute,
National Academy of Sciences of Ukraine,
5, Naukova St., Lviv, 79060, Ukraine

INVESTIGATIONS OF COSMIC SOURCES
RADIOEMISSION SCINTILLATIONS
DUE TO INTERPLANETARY PLASMA
IRREGULARITIES AT THE INSTITUTE
OF RADIO ASTRONOMY, NAS UKRAINE

Purpose: Review of investigations of cosmic sources radio-emission scintillations due to interplanetary plasma irregularities made at the Institute of Radio Astronomy of the National Academy of Sciences of Ukraine, from the first observations in the mid-70s until now.

Design/methodology/approach: In the course of preparation of this paper, the authors have reviewed, analyzed and summarized the information being published in the home and foreign publications, and reported at scientific conferences.

Findings: The investigations of the interplanetary scintillations carried out at the Institute of Radio Astronomy, NAS Ukraine have been reviewed. A retrospective discussion has been made on how in the course of these researches the

knowledge about the basic parameters of interplanetary scintillations in the decameter wavelength range, as well as that on the important parameters of the solar wind and its structure, have been obtained. Also, various methods of processing and analysis of experimental data were offered, and new means for receiving cosmic radiation were created. The place and importance of the discussed researches for the world science are shown.

Conclusions: Over the years since the beginning of the research, the think tank of the Department of Low-Frequency Radio Astronomy of the Institute of Radio Astronomy, NAS Ukraine has obtained a number of new relevant results, which bring Ukraine into the cohort of world centers of interplanetary scintillation researches. The construction of a new GURT radio telescope, among other things, creates new prospects for the development of this relevant line of investigation.

Key words: interplanetary scintillations, decameter wavelength range, solar wind, solar wind stream structure, coronal mass ejection

Стаття надійшла до редакції 11.01.2021