

## РАДІОАСТРОНОМІЯ І АСТРОФІЗИКА

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra26.04.287>

УДК 524.352-77, 524.523-77,  
524.77-77, 524.827

М. А. СИДОРЧУК, Н. М. ВАСИЛЕНКО, О. М. УЛЬЯНОВ,  
О. О. КОНОВАЛЕНКО, Д. В. МУХА,  
Є. А. АБРАМЕНКОВ, К. М. СИДОРЧУК, А. І. МЯСОЄД  
Радіоастрономічний інститут НАН України,  
вул. Мистецтв, 4, м. Харків, 61002, Україна  
E-mail: sidor@rian.kharkov.ua

### 50 РОКІВ ДОСЛІДЖЕНЬ В КОНТИНУУМІ НА РАДІОТЕЛЕСКОПІ УТР-2

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

*Предмет і мета роботи: Наведено результати досліджень континуального декаметрового радіовипромінювання фону Галактики, областей іонізованого водню, залишків спалахів наднових, позагалактичних дискретних джерел, протяжних галактик, галактичних скупчень, метагалактичного фону. Метою роботи є огляд результатів, отриманих впродовж 50 років досліджень на радіотелескопі УТР-2 нашої Галактики та її населення, а також позагалактичних радіоджерел у безперервному спектрі радіовипромінювання на гранично низьких для земних спостережень частотах. Методи та методологія: Виконано огляд, аналіз, збір архівних даних публікацій в різних виданнях, що стосуються предмету цієї роботи.*

*Результати: Наведено основні результати досліджень областей іонізованого водню, залишків спалахів наднових, фонового випромінювання Галактики та її великомасштабної структури, отримано карти цих джерел радіовипромінювання. Описано каталог позагалактичних дискретних радіоджерел значної частини Північного неба та надано космологічні висновки на підставі його аналізу; отримано оцінку яскравісної температури ізотропного позагалактичного фону; вперше, стисло, наведено результати спостережень галактики Андромеда та двох скупчень галактик Coma та A2255.*

*Висновки: Усі наведені результати підкреслюють унікальність і важливість досліджень в декаметровому діапазоні довжин хвиль, а велика площа, гнучка структура, постійне вдосконалення роблять радіотелескоп УТР-2, попри його поважний вік, незамінним інструментом для вирішення найважливіших задач сучасної радіоастрономії. Так, наприклад, лише в діапазоні 10 ÷ 30 МГц найпоширеніший у Всесвіті елемент – водень, його іонізована частина, стає оптично товстим і починає поглинати синхротронне випромінювання на промені зору, що дозволяє досить легко розділити теплову і нетеплову компоненти радіовипромінювання. Ця властивість дозволяє незалежним способом визначати електронну температуру областей іонізованого водню, електронну концентрацію на промені зору при дослідженні емісійних областей водню. Під час досліджень залишків спалахів наднових за завалом їх спектра можливо визначити розташування іонізованої матерії – перед, усередині або за залишком. За виглядом радіозображень залишка спалаху надвової НВ3 зроблено припущення щодо існування навколо нього реліктової оболонки іонізованого водню, що виникла внаслідок первісного ультрафіолетового спалаху надвової зірки.*

*Вперше публікуються карти великомасштабної структури радіовипромінювання Північного неба в діапазоні схилень від  $-15^\circ$  до  $+85^\circ$  на гранично низьких для земних спостережень частотах 10, 12.6, 14.7, 16.7, 20 і 25 МГц, які, крім власної наукової цінності, дозволять верифікувати та скорегувати результати картографування на телескопі УТР-2. З використанням карт, отриманих за повної роздільної здатності УТР-2, і розробленого методу багаточастотних T–T діаграм вдалося розділити фонове випромінювання на галактичну і позагалактичну складові та побудувати спектр останньої.*

*З аналізу найбільш повного в декаметровому діапазоні каталогу дискретних джерел випливає, що існує обрив у просторовому розподілі за червоним зсувом для всіх класів позагалактичних джерел.*

*Зроблено припущення про існування кільця іонізованого водню в диску Туманності Андромеди. Показано, що основна частина декаметрового випромінювання від скупчень галактик йде від гало та реліктів.*

*Ключові слова: декаметровий діапазон, дискретні джерела, залишки спалахів наднових, каталог, континуальне радіовипромінювання, області НІІ, УТР-2, фонове випромінювання*

## 1. Вступ

Цього року виповнилося 50 років від дня офіційної інавгурації унікального радіотелескопа декаметрових хвиль УТР-2 (Український Т-подібний радіотелескоп), розташованого в 70 км на південний схід від Харкова в Радіоастрономічній обсерваторії (РАО) ім. С. Я. Брауде. Історія його створення, технічні характеристики, еволюція приймально-обчислювальної апаратури та основні напрямки досліджень докладно описані в першій статті циклу ювілейних публікацій, присвяченій 110-річчю засновника декаметрової радіоастрономії в Україні академіку С. Я. Брауде [1], а також в статтях за деякими напрямками радіоастрономічних досліджень [2–6].

Радіовипромінювання Всесвіту складається з низки об'єктів випромінювання: дискретних (здебільшого це позагалактичні об'єкти, такі як радіогалактики і квазари) і протяжних джерел (області іонізованого водню (НІІ), планетарні туманності, молекулярні, пилові хмари і залишки спалахів наднових зірок (ЗНН)), а також розподіленого фонового випромінювання. Крім того, континуальне (безперервне) радіовипромінювання містить і нерозділені дискретні джерела, і позагалактичну складову. Сам радіофон є сумою теплового і нетеплового випромінювання. Внесок кожного компонента в загальне випромінювання залежить від частоти спостереження. Отже, яскравісна температура випромінювання неба  $T$  буде сумою декількох компонентів:

$$T = T_G + T_M + T_S + T_Z,$$

де  $T_G$  – яскравісна температура дифузного випромінювання Галактики,  $T_M$  – ізотропна яскравісна температура позагалактичного фонового випромінювання,  $T_S$  – яскравісна температура протяжних і точкових джерел випромінювання,  $T_Z$  – похибки рівня нуля (систематичні похибки, пов'язані з особливостями інструмента, методом спостережень).

Так, на частотах вище 1 ГГц домінує теплове випромінювання, а на частотах нижчих за 100 МГц починає превалювати нетеплове радіовипромінювання, інтенсивність якого збільшується зі зменшенням частоти. У підсумку на робочих частотах радіотелескопа УТР-2 (8 ÷ 33 МГц) фонове радіовипромінювання має здебільшого

нетеплову природу. Нетеплове випромінювання – це синхротронне випромінювання релятивістських електронів в магнітному полі. Яскравісна температура синхротронного випромінювання залежить від розподілу релятивістських електронів і напруженості магнітного поля. Отже, просторовий розподіл температури характеризує структуру магнітного поля в Галактиці, енергетичний і просторовий розподіл електронної компоненти космічних променів. Це обумовлює постійний інтерес до спостережень радіоконтинууму на декаметрових хвилях.

У Радіоастрономічному інституті НАН України в РАО ім. С. Я. Брауде спостереження радіовипромінювання неба проводяться з 1970-х рр. Спочатку це були дослідження на окремих антенах. Так, наприклад, В. В. Кримкін у 1969 р. дослідив низькочастотне радіовипромінювання фону на тонких напівхвильових диполях на частотах 20, 25, 31 і 38 МГц у зенітному напрямку і визначив його спектр [7]. А. В. Антонов за допомогою поляризованої антени-решітки з 48 турнікетних диполів побудував карту Північного “радіонеба” на частоті 10 МГц [8]. До того ж, відкоригувавши карту Південного неба, отриману в Австралії на частоті 10.2 МГц [9], він уперше в світі побудував карту всього неба на граничній для земних спостережень частоті з роздільною здатністю  $16.5^\circ$ . А в 1971–1972 рр. на західному плечі радіотелескопа УТР-2, який щойно став до ладу, І. М. Жук здійснив огляд безперервного космічного радіовипромінювання Північної півкулі неба на п'яти частотах: 12.6, 14.7, 16.7, 20 і 25 МГц, – з роздільною здатністю  $0.5^\circ \times 21^\circ$  на центральній частоті 16.7 МГц в інтервалі схилень  $5^\circ < \delta < 90^\circ$  і проаналізував його спектр [10].

Попри те, що адекватного за площею, роздільною здатністю та чутливістю інструменту, здатного працювати в декаметровому діапазоні довжин хвиль, дотепер немає в світі, не можна не згадати низку важливих публікацій, присвячених дослідженням в цьому діапазоні. Особливо це стосується оглядів декаметрового космічного фонового випромінювання та його картографування. Передусім, крім згаданої вище роботи [9], слід відзначити піонерські дослідження [11] (Англія), в яких для аналізу фону на частотах 26 і 38 МГц вперше був застосований метод Т–Т діаграм. У Великій Британії на невеликій антенній решітці для низки схилень Північного неба також

виміряно яскравісні температури фону на частотах 13.15, 17.5 і 81.5 МГц та побудовано спектр фонового радіовипромінювання у діапазоні від 13 до 404 МГц [12]. В Австралії на частоті 16.5 МГц (на Тасманії) [13] і 30 МГц [14] були отримані карти всього Південного неба. Найбільш цитовані роботи – це огляд значної частини Північного неба на частоті 10 МГц з роздільною здатністю близько  $2^\circ$  [15] і 73 % доступного для спостережень неба на 22 МГц [16], які виконані в обсерваторії DRAO (Пентіктон, Канада) на Т-подібному радіотелескопі з роздільною здатністю  $1.1^\circ \times 1.7^\circ$ . Ці дві роботи використовуються для побудови моделі глобального космічного радіовипромінювання. Хоча всі дослідження в декаметровому діапазоні виконані на інструментах з удвічі, а іноді і на два порядки гіршими роздільною здатністю та чутливістю, вони внесли значний вклад в розуміння особливостей радіовипромінювання в цьому діапазоні.

У цій оглядовій статті ми торкнемося головних результатів досліджень, виконаних впродовж 50 років на радіотелескопі УТР-2 в безперервному спектрі декаметрового радіовипромінювання Всесвіту. Спочатку мова піде про нашу Галактику та її населення, а потім про джерела метагалактичного радіовипромінювання.

## 2. Галактичний фон, емісійні туманності, залишки спалахів наднових

Наша Галактика за кількістю типів астрофізичних об'єктів нагадує своєрідний “зоологічний парк”. Вона активно досліджується в усіх діапазонах спектру електромагнітного випромінювання. Вітчизняні низькочастотні дослідження дозволили зробити велику кількість відкриттів. Особливості декаметрового діапазону дають змогу виявити нові слабкі протяжні джерела з крутими спектрами та області іонізованої матерії. Вони є запорукою майбутніх вагомих результатів у галузі астрофізики та радіоастрономії.

### 2.1. Галактичний фон

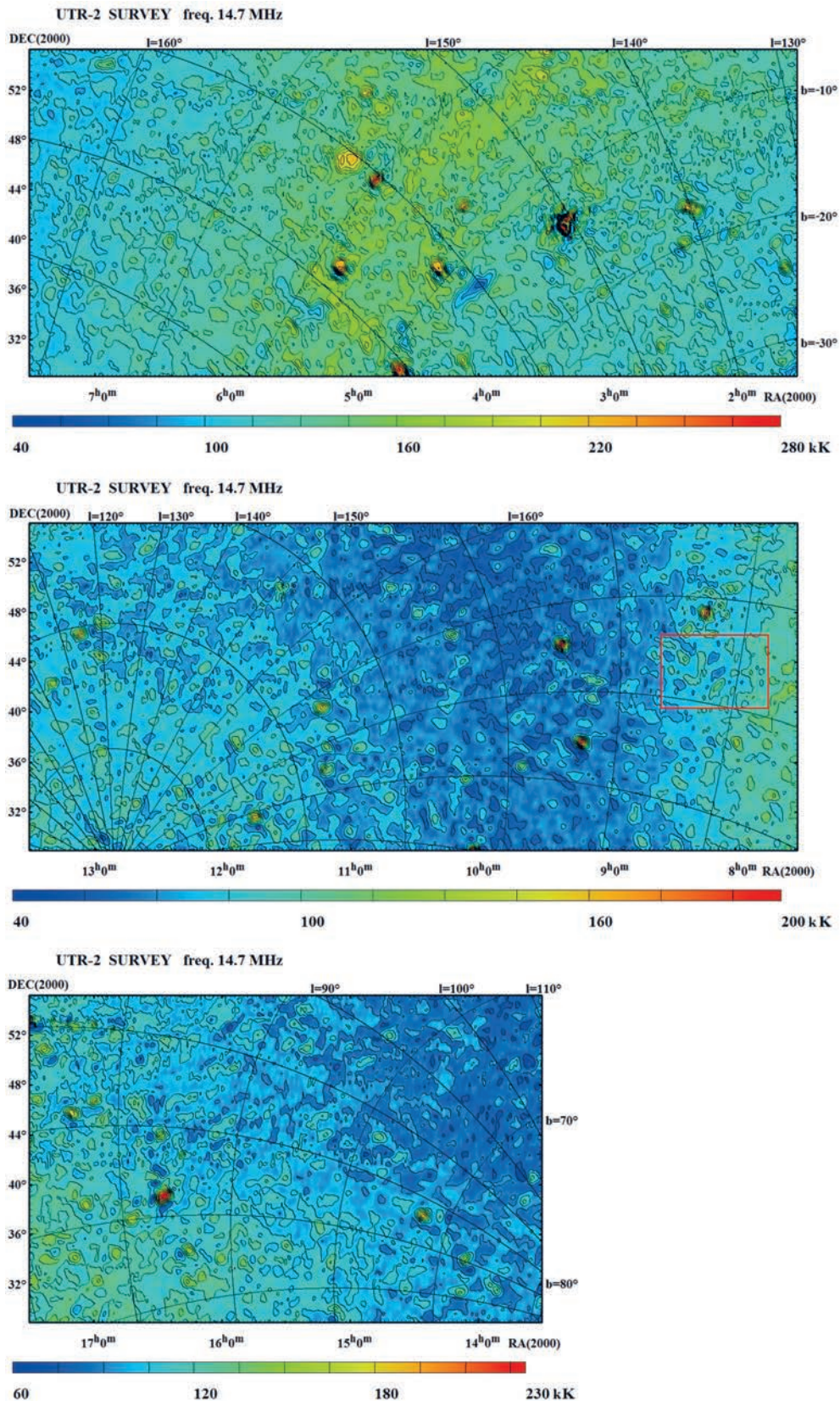
На найбільшому у світі декаметровому радіотелескопі УТР-2 радіоогляд Північного неба за допомогою повної антени виконувався від 1980 до 2013 р. лише вночі. Спостереження реалізовувалися шляхом сканування неба за рахунок обер-

тання Землі п'ятипроменевою діаграмою спрямованості (ДС) антени на фіксованих схиленнях. Кожен голкоподібний промінь ДС відстоїть від сусіднього на  $23'$  у меридіанній площині. Калібрування вихідної потужності виконувалися за допомогою еталонного генератора шуму для кожного спостереження. Загальна кількість спостережень становила понад 2000 ночей. Кількість надійних спостережень для кожної точки огляду становила від 5 до 40 реалізацій. Накопичені дані дозволяють побудувати радіозображення Північного неба в інтервалах схилень  $29^\circ \div 55^\circ$  і прямих сходжень  $1^h \div 19^h$ , приведених до епохи 2000 р., на частотах 14.7, 16.7, 20 і 25 МГц з рекордною для цього діапазону чутливістю і кутовою роздільною здатністю від  $\approx 65'$  на частоті 14.7 МГц до  $\approx 28'$  на частоті 25 МГц.

Для побудови карт за спостереженнями у континуумі на радіотелескопі УТР-2 розроблено методи, алгоритми та пакет програм з інтерфейсом користувача “Sky Continuum Survey”. Застосування отриманих алгоритмів дозволило побудувати радіозображення у різних системах координат (екваторіальній і галактичній). Створено базу даних, що містить низку каталогів дискретних і протяжних радіоджерел, місце розташування та кутові розміри яких можуть бути нанесені на отримані карти. Розроблений пакет програм дає змогу обробляти карти – виділяти фонову складову, знаходити щільності потоків протяжних об'єктів, зводити карти до однакової просторової роздільної здатності, будувати карти температурних спектральних індексів і конвертувати отримані радіозображення у формат FITS [17]. Усі наведені в цій статті карти отримані за допомогою цього пакету програм. На рис. 1 продемонстровано фрагменти карти Північного неба, огляд якого було виконано на радіотелескопі УТР-2 на частоті 14.7 МГц в діапазоні схилень  $29^\circ \div 55^\circ$  і прямих сходжень  $01^h 30^m \div 17^h 30^m$  в епосі 2000 р. На карті чітко видно як дискретні, так і протяжні джерела (наприклад, відомий ЗНН НВ9 з координатами  $05^h 01^m$ ,  $+46^\circ 40'$  на верхньому фрагменті карти) та дифузне фонове випромінювання.

Як відомо, на виході кореляційного радіотелескопа, яким є УТР-2, відсутня постійна складова прийнятого сигналу. Вона відновлюється спеціальними методами та додатковою апаратурою, за допомогою якої вводилася амплітудна





**Рис. 1.** Фрагменти карти Північного неба, отримані на УТР-2 на частоті 14.7 МГц. На карту нанесені галактичні координати з кроком 10° і контури яскравості температур з кроком 20 кК. Прямокутником на середньому фрагменті мапи позначена область неба, для якої виконано поділ фону на галактичну та метagalacticну компоненти (див. розділ 3)

модуляція коефіцієнта передачі антен УТР-2 в частині кожної з трьох складових апертури (плечей Північ, Південь, Захід). Остаточне формування ДС, близької до функції  $\sin x/x$  в головних площинах, здійснювалося в процесі обробки на комп'ютері [18]. Крім того, спостереження велися понад 30 років, впродовж яких виконувалася модернізація системи підсилення та комунікацій антен, змінювалися їхні параметри, що ускладнювало співставлення даних. Для коригування відновлювальної постійної складової фону і калібрування карт, отриманих на повному телескопі УТР-2, були виконані спостереження за допомогою однієї секції антени "Північ-Південь" (П-П) радіотелескопа УТР-2 на частотах 10, 12.6, 14.7, 16.7, 20, 25 МГц. За такої умови відсутня проблема відновлення постійної складової прийнятого космічного випромінювання.

Для спостережень були використані секції № 5 і № 6 антени П-П. Для збільшення кількості статистично незалежних каналів і контролю роботи апаратури сигнал з секції ділився навпіл і подавався на радіометри (див. рис. 2), лінійні детектори і фіксувався 16-бітовим 30-канальним аналого-цифровим перетворювачем (АЦП). Циклічне сканування неба здійснювалося в меридіанній площині з кроком  $\Delta\delta = 2^\circ$  і темпом переключення ДС  $\Delta T_{\text{scan}} = 30$  с в діапазоні схилень

$\delta = -15^\circ \div +85^\circ$ . У такому режимі в нічний час за рахунок обертання Землі покривалася значна область Північного неба. Функціональна схема спостережень наведена на рис. 2.

В результаті отримано карти великомасштабної структури Північного неба. На рис. 3, а та рис. 3, б представлені карти на шести частотах у діапазоні 10÷25 МГц, а в табл. 1 – параметри цього огляду.

Карті адекватно представляють великомасштабну структуру декаметрового фонового випромінювання Галактики в Північній півкулі неба. Чітко ідентифікуються диск Галактики, Північний полярний шпур і низка потужних радіоджерел, таких як Кассіопея А і Лебідь А (див. рис. 3, а та рис. 3, б, ліва верхня частина карт).

Ці карти становлять і самостійну важливу наукову цінність. Вони можуть бути використані для аналізу спектра декаметрового фонового випромінювання, а разом з високочастотними даними і для досліджень морфологічних змін великомасштабної структури фонового випромінювання. Крім того, ці карти корисні для оцінки необхідних ефективних площ радіотелескопів для виконання різних пошукових програм на низьких частотах у Північній небесній півсфері. Вони також служать хорошим тестом для нового радіотелескопа ГУРТ, споруджуваного на тери-

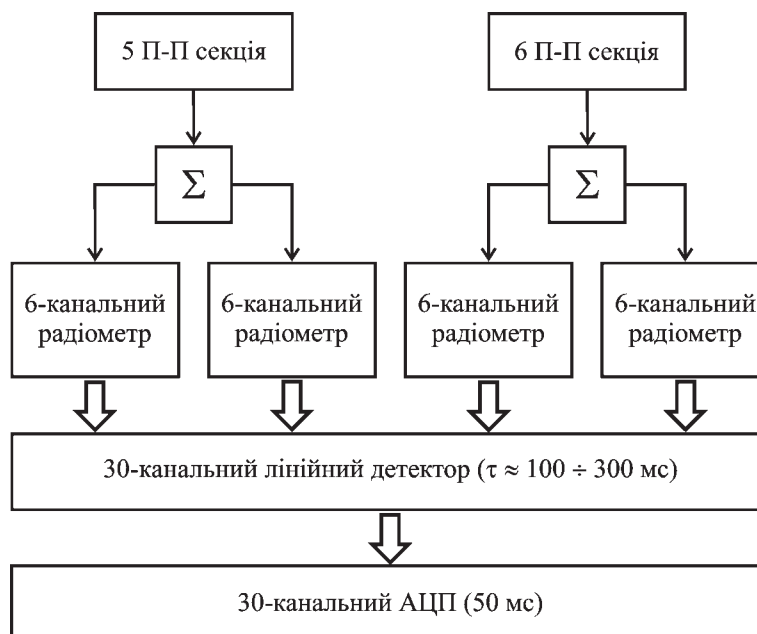


Рис. 2. Функціональна схема спостережень великомасштабної радіоструктури Північного неба з використанням окремих секцій УТР-2 в діапазоні схилень  $-15^\circ \div +85^\circ$



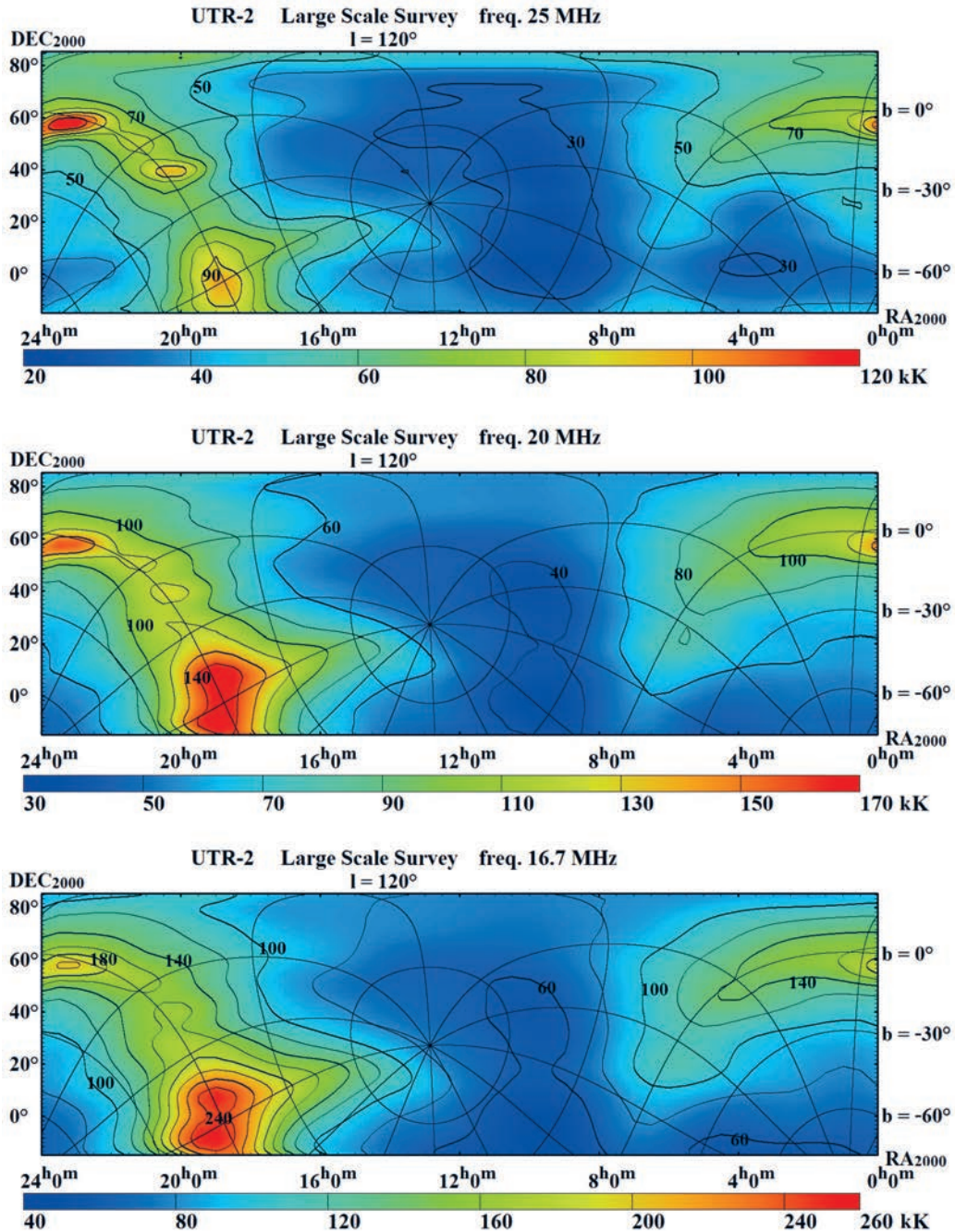


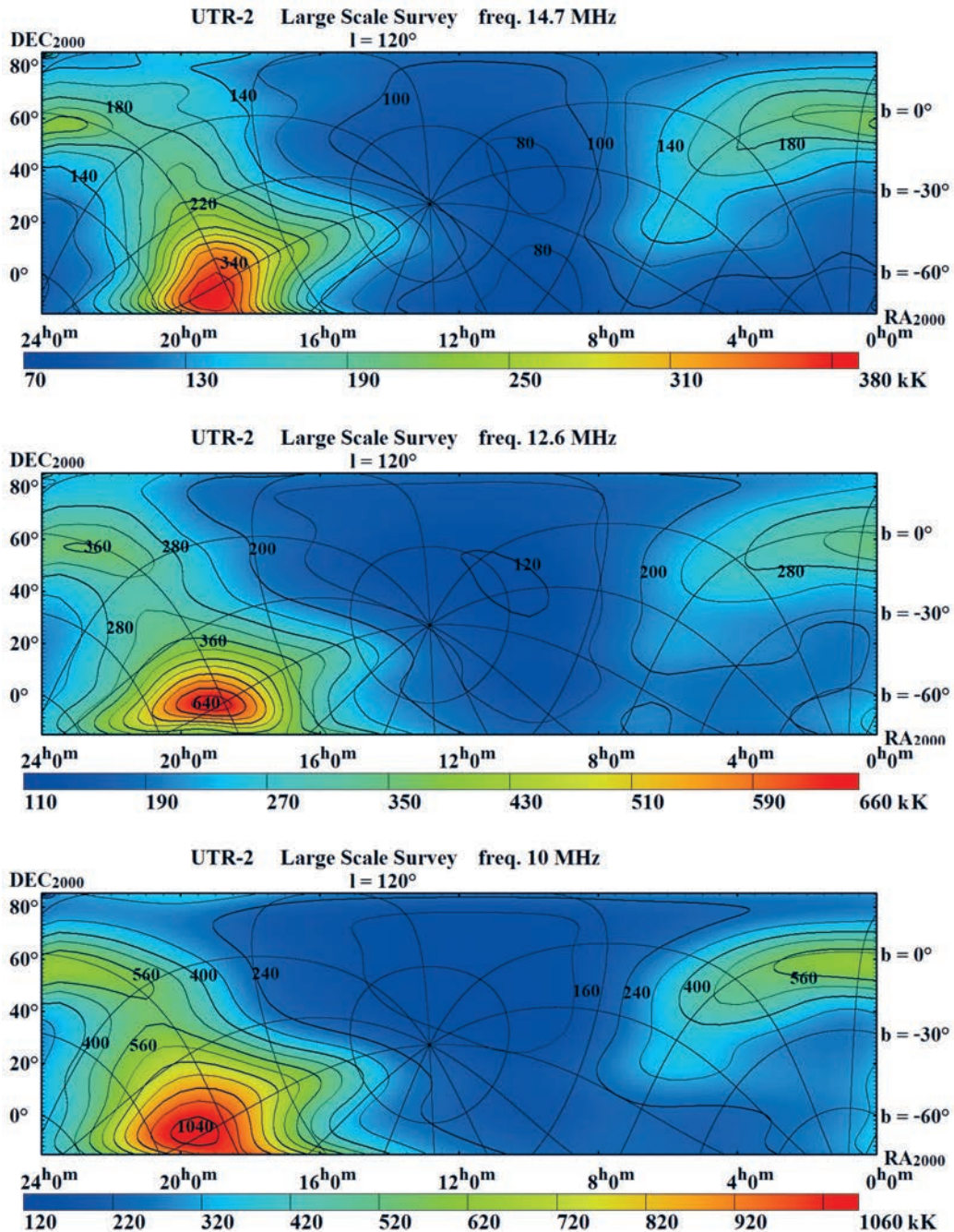
Рис. 3, а. Карти великомасштабної структури розподілу яскравісної температури Північного неба на частотах 25, 20 та 16.7 МГц. Карті отримано за спостереженнями на одній секції антени П-П УТР-2 і представлено в екваторіальних координатах з накладенням ліній галактичних координат з кроком 30°. Цифри на температурних контурах карт надано в тисячах кельвінів

торії PAO ім. С. Я. Брауде та для низькочастотних інструментів LOFAR, LWA, SKA.

## 2.2. Емісійні туманності

Особливістю декаметрового діапазону є те, що в ньому досить легко розділяються теплова та

нетеплова компоненти радіовипромінювання (теплова матерія проявляється в поглинанні на тлі інтенсивного нетеплового випромінювання через те, що на декаметрових хвилях іонізована матерія стає оптично товстою та ефективно екранує нетеплове випромінювання). Ця влас-



**Рис. 3, б.** Карти великомасштабної структури розподілу яскравісної температури Північного неба на частотах 14.7, 12.6 та 10 МГц. Карти отримано за спостереженнями на одній секції антени П-П УТР-2 і представлено в екваторіальних координатах з накладенням ліній галактичних координат з кроком  $30^\circ$ . Цифри на температурних контурах карт надано в тисячах кельвінів

тивість безперервного (континуального) космічного радіовипромінювання є вельми корисною у дослідженні джерел теплового випромінювання: областей іонізованого водню (області НІІ), планетарних туманностей, молекулярних та пилових хмар.

Одним із перших на радіотелескопі УТР-2 було розпочато дослідження протяжних емісійних газових туманностей [18]. Основу методики вивчення іонізованих газових туманностей становить специфічний прояв областей НІІ на декаметрових хвилях в поглинанні на тлі інтенсив-



Таблиця 1. Параметри огляду за допомогою секції антени П-П УТР-2

Частота, МГц	10.0	12.6	14.7	16.7	20.0	25.0
Смуга пропускання радіометра, кГц	10	10	10	10	10	10
Роздільна здатність в зеніті, $\alpha^\circ \times \delta^\circ$	30×10	25×8	21×6.8	19×6	16×5	12×4
Флуктуаційна чутливість, кК						
– у галактичній площині ( $b < \pm 20^\circ$ )	233	66	38	23	15	10
– поза диском Галактики	124	55	32	17	11	9
– в області мінімальної яскравості	70	37	25	12	8	6

ного радіовипромінювання Галактики, що досягає сотень тисяч кельвінів. Метод обробки полягає у співставленні даних вимірювань областей НП на двох крайніх частотах робочого діапазону УТР-2: 12.6 і 25 МГц. На більш низькій частоті переважний внесок у яскравісну температуру дає локальне галактичне нетеплове випромінювання, яке знаходиться між спостерігачем і туманністю. Тому на цій частоті електронною температурою можна було знехтувати. На частоті 25 МГц електронна температура дає вже значний внесок. Через ітерації вдавалося отримати обидва параметри: інтенсивність радіовипромінювання локального фону та електронну температуру області НП. Після об'єднання результатів спостережень на УТР-2 з високочастотними даними можна оцінити оптичну товщину ( $\tau$ ), міру емісії (ЕМ) та кінетичну температуру ( $T_e$ ) областей НП, визначити теплову структуру туманностей.

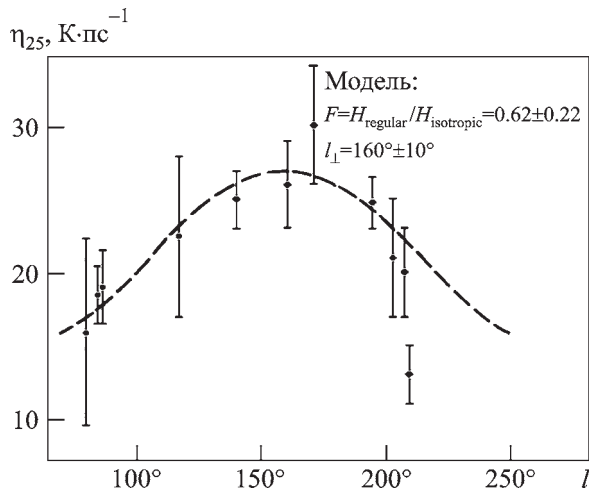
Додаткові можливості виникають внаслідок ефекту екранування областями НП більш віддалених частин галактичного диску. В результаті можливо знайти середню об'ємну щільність ( $\eta$ ) нетеплового випромінювання міжзоряного середовища на промені зору до туманності при відомій відстані до неї ( $L$ ). Так, наприклад, в напрямку антицентра Галактики (інтервал довгот  $l = 80^\circ \div 120^\circ$ ) спостережено всі доступні УТР-2 протяжні області з кутовим розміром  $\geq 1^\circ$  і визначено їхні фізичні характеристики (табл. 2).

Розподіл об'ємної щільності залежно від галактичної довготи вказує на наявність анізотропії у напрямку магнітного поля ( $H$ ) на масштабах  $\leq 1$  кпк в напрямку антицентра Галактики. Це дозволило виділити спрямовану та ізотропну компоненти магнітного поля з відношенням напруженостей 0.62 і виміряти орієнтацію спрямованої компоненти поля, ортогональну галактичній довготі  $160^\circ$  (див. рис. 4). Була вияв-

Таблиця 2. Об'ємна щільність Галактичного фону на частоті 25 МГц

Назва НП	$T_e$ , К	ЕМ, пк·см <sup>-6</sup>	$\tau$ (25 MHz)	$l$ , °	$L$ , пк	$\eta$ , К·пк <sup>-1</sup>
S 117	7100	5400	6.5	85	1040	18.5±2
S 119	5200	500	0.9	87	870	19±2.5
S 190	4900	1500	3.0	135	2200	10.5±0.5
S 202	1500	80	1.2	141	1000	25±2
S 220	4400	13000	30.0	161	490	26±3
S 229	6400	630	0.8	172	650	30±4
S 236	11000	8000	8.0	174	3000	7.2±1
S 264	2800	200	0.8	195	500	25±2
S 273	4100	275	0.7	203	710	21±4
S 275	3600	3500	10.0	206	1500	12±1
S 276	5900	220	0.4	209	500	13±2
S 277	6000	1350	2.1	207	500	20±3
S 280	2000	1400	6.4	209	1500	11.5±1
S 282	4900	430	0.9	210	1500	12.5±1
S 284	2000	1550	9.7	212	5200	3.7±0.5





**Рис. 4.** Залежність об'ємної щільності Галактичного фону в локальному рукаві на частоті 25 МГц. Апроксимуюча пунктирна крива відповідає моделі магнітного поля ( $H$ ), що складається з регулярної та ізотропної складових;  $l_{\perp}$  – напрямок, ортогональний регулярній складовій поля

лена досить висока інтенсивність нетеплового випромінювання місцевого галактичного рукава. На робочих частотах УТР-2 вона більш ніж на порядок перевищує аналогічну інтенсивність в просторі між рукавами Галактики. Це співвідношення спектральних щільностей радіовипромінювання фону дозволило вперше оцінити відношення напруженостей магнітного поля в місцевому рукаві ( $H_{arm}$ ) Оріона і в просторі, розташованому між рукавами Галактики, ( $H_{interarm}$ ). Питоме відношення виявилось близьким до 10 ( $\eta_{\perp} = (27 \pm 3) \text{ К} \cdot \text{пк}^{-1}$ , об'ємна щільність в просторі між рукавами Галактики  $\eta_{interarm} \leq 1 \text{ К} \cdot \text{пк}^{-1}$ ,  $H_{arm}/H_{interarm} \sim 10$ ) [19].

Отже, дослідження областей НП в декаметровому діапазоні довжин хвиль дають новий незалежний інформативний інструмент вивчення міжзоряного середовища як з погляду індивідуальних об'єктів, так і з погляду взаємодії об'єктів різної природи.

### 2.3. Залишки спалахів наднових

ЗНН – це об'єкти в галактиках, утворені вибухами деяких зірок на останній стадії їх еволюції (наднових зірок) через скидання їх зовнішніх шарів. При подальшому розширенні оболонок в міжзоряне середовище вони “згрібають” на себе міжзоряну речовину. Спалахи наднових зірок і їх залишки є важливими об'єктами га-

лактичного населення. З ними пов'язують наявність космічних променів, іонізацію плазми і структурування міжзоряного середовища, а також прискорення електронів. Наднові зірки, що спалахують, народжують такі екзотичні популяції населення галактики, як пульсари, нейтронні зірки і чорні діри. Завдяки нагортанню та ущільненню речовини, присутньої в міжзоряному середовищі, ЗНН є спусковим механізмом процесів зореутворення.

У радіодіапазоні ЗНН спостерігаються як нетеплові радіоджерела. Як відомо, найяскравіші радіоджерела нашого неба – це Кассіопея А і Крабоподібна туманність. Вони є молодими ЗНН, причому спалах наднової в Крабоподібній туманності стався на пам'яті людства і був зафіксований у 1054 р. нашої ери. Спостережними аспектами ЗНН є їх просторова структура, енергетичні параметри, частотний спектр, взаємодія з навколишнім міжзоряним середовищем.

Специфічні можливості декаметрового діапазону відкриваються, зокрема, при вивченні ЗНН. Слід зазначити, що багаточастотні спостереження на УТР-2 виконано з наразі найкращими для цих довжин хвиль кутовою роздільною здатністю та чутливістю.

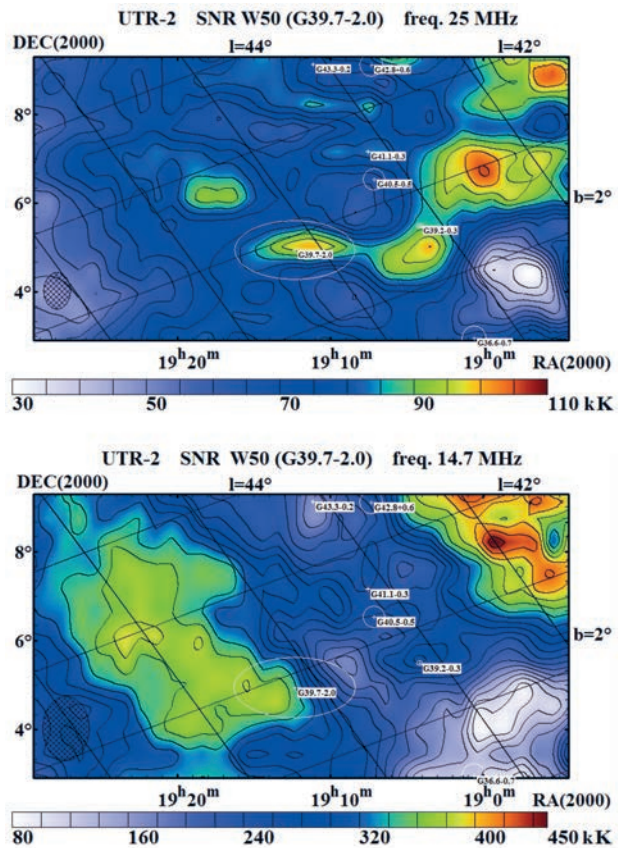
Вже перші спостереження на УТР-2 виявили, що низка ЗНН, наприклад, PKS0607+17 [20], HB3 [21], СТА1 [22], Петля Єдинорога [23], істотно відрізняються за морфологією від радіозображень цих об'єктів на високих частотах. Це не можна пояснити гіршою роздільною здатністю УТР-2. На низьких частотах перераховані об'єкти мають помітно більші кутові розміри, ніж на вищих частотах. Водночас Петля Єдинорога [23] практично зникла, а залишок 3C58 [21] став зовсім непомітним у випромінюванні в усьому декаметровому діапазоні.

Що стосується морфологічних відмінностей Петлі Єдинорога на низьких частотах порівняно з даними спостережень на вищих частотах, то їх причина виявилася пов'язаною з іншою особливістю декаметрового діапазону. Всі досліджені на УТР-2 ЗНН, крім залишку Петля Лебеда, мають на низьких частотах так званий завал в інтегральному спектрі випромінювання. Серед чотирьох відомих причин такого завалу спектра основною вважається поглинання нетеплового випромінювання залишку в іонізованому водні. Завдяки широкій смузі робочих

частот радіотелескопу УТР-2 за нахилом кривої спектру після завалу можна зробити оцінки місця розташування матерії, поглинаючої нетеплове випромінювання. Тобто виявити, знаходиться вона на промені зору перед чи після ЗНН або розподілена в самому джерелі. Оцінки показують, що для об'єктів HB9 [24], HB21 [25], СТА1 [22] і IC443 [21] тепловий компонент розподілений всередині цих джерел. Це витікає зі спостережуваних завалів їх спектрів. Для ЗНН Петля Єдиногога [23], PKS0607+17 [20] і 3C58 [21] більший внесок в спостережуваний завал вносить розподілений іонізований водень диска Галактики й областей НІІ, які знаходяться неподалік від залишків в межах променя зору УТР-2. У випадку HB3 – у ймовірній реліктовій оболонці НІІ з мірою емісії  $\approx 120$  пс·см<sup>-6</sup> і в гало комплексу W3/W4 [21]. Наскільки катастрофічним може бути вплив на низькочастотні радіозображення розподіленого теплового компонента диска Галактики, особливо в напрямку його центру, можна переконавшись на рис. 5 і рис. 6. На цих рисунках зображені карти ділянки диска Галактики. На радіозображеннях на рис. 5 потрапили 7 ЗНН і на рис. 6 – 14 ЗНН. Ці карти отримані на частотах 25, 20, 16.7 і 14.7 МГц. На наведених картах можна впевнено ідентифікувати лише відомі досить потужні протяжні ЗНН – еліпсоїдальної форми W50 (G39.7-2.0) на рис. 5 і майже круглої форми W44 (G34.7-0.4) на рис. 6 – і то тільки на частотах 25 і 20 МГц. Вже на 14.7 МГц від яскравого джерела W50 залишається лише половина, а W44 практично зникає під фоном (див. табл. 3), і на картах все контрастніше в поглинанні проявляється Галактичний диск! Для підкреслення ефекту поглинання на цих картах використовувалася квадратична залежність кольорової палітри від білого до чорного кольору.

У цій статті ми також вперше наводимо карти ЗНН Петля Лебеда на двох частотах, 25 та 12.6 МГц, (рис. 7), його спектр (рис. 8) і щільності потоків радіовипромінювання ЗНН W50, W44 та Петля Лебеда (табл. 3).

Ще одна можлива причина завалу спектра на декаметрових хвилях була виявлена нами при дослідженні залишку HB3. ЗНН HB3, можливо, оточений оболонкою іонізованого водню, що є реліктовою зоною НІІ. Це видно з декаметрових карт (див. рис. 9). На них спостерігається вплив

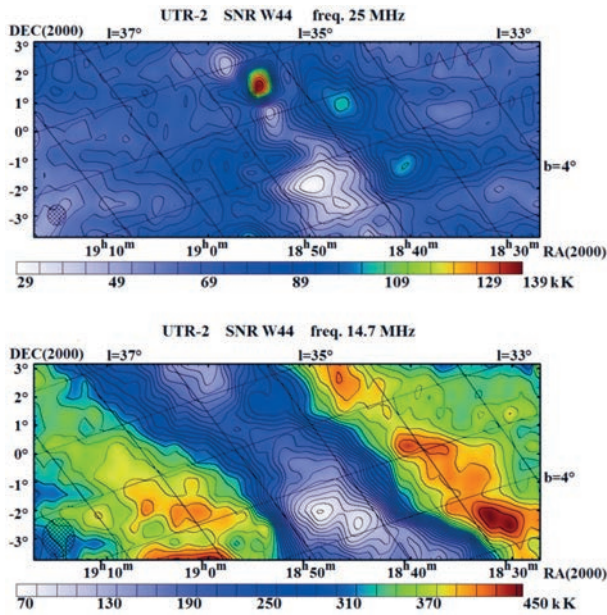


**Рис. 5.** Радіозображення ділянки диска Галактики в напрямку центра з ЗНН W50 (G39.7-2.0) на частотах 25 МГц (верхня панель) і 14.7 МГц (нижня панель). Контури яскравості температур нанесені відповідно з кроком 5 і 20 кК. Білим кольором на картах позначені високочастотні кордони ЗНН і їх назви. Заштрихованим еліпсом в лівому нижньому куті карт за рівнем 0.5 визначені кутові розміри ДС УТР-2. Галактичні координати ( $l, b$ ) нанесені з кроком  $2^\circ$

холодної, частково іонізованої молекулярної хмари  $^{12}\text{CO}$  і комплексу іонізованих областей W3\W4, що призводить до додаткового екранування HB3. Розглядаються моделі, в яких іонізована зона виникає не тільки внаслідок первісного ультрафіолетового спалаху, який утворюється після вибуху наднової, але і через рентгенівське випромінювання плазми, що нагрівається ударною хвилею ЗНН.

І зрештою слід зазначити, що, попри вельми індивідуальні властивості вивчених нами ЗНН, можна зробити попередній висновок, що старі протяжні залишки мають або оболонки НІІ, або генетично пов'язаний з ними тепловий компонент. Виділити їх на високих частотах на тлі нетеплового випромінювання – дуже склад-



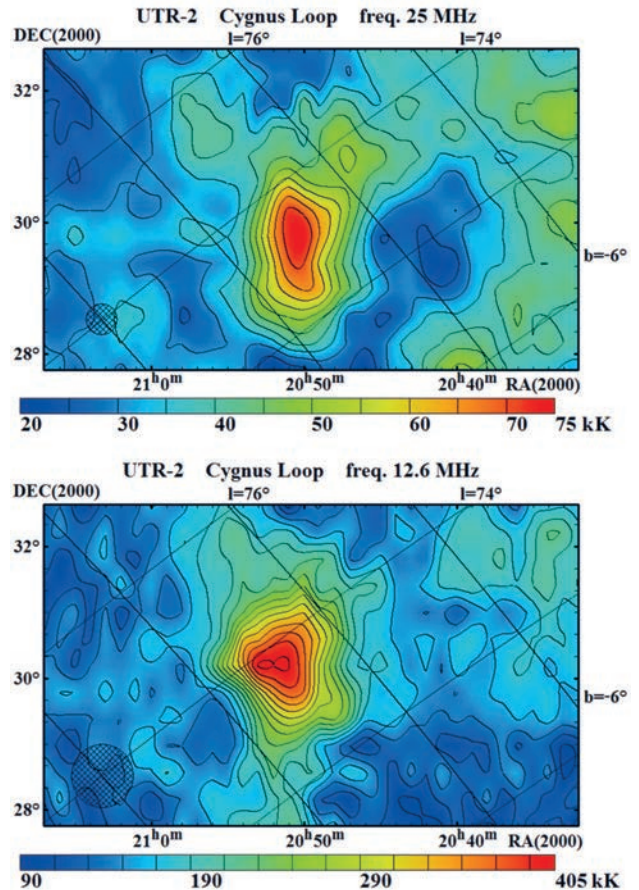


**Рис. 6.** Радіозображення ділянки диска в напрямку центру Галактики з ЗНН W44 (G34.7-0.4) з координатами центру  $\alpha_{2000} = 18^{\text{h}}56^{\text{m}}$ ,  $\delta_{2000} = 01^{\circ}22'$  на частотах 25 МГц (верхня панель) і 14.7 МГц (нижня панель). Контури яскравості температур нанесені відповідно з кроком 5 і 15 кК. Заштрихованим еліпсом в лівому нижньому куті карт за рівнем 0.5 визначені кутові розміри ДС УТР-2. Галактичні координати ( $l$ ,  $b$ ) нанесені з кроком  $2^{\circ}$

**Таблиця 3. Щільності потоків радіовипромінювання ЗНН W50, W44, Петля Лебеда**

Частота, МГц	Щільність потоку, Ян		
	W50	W44	Петля Лебеда
12.6	–	–	$990 \pm 300$
14.7	$210 \pm 94$	$35 \pm 17$	$1040 \pm 260$
16.7	$320 \pm 128$	$70 \pm 28$	$820 \pm 205$
20.0	$245 \pm 74$	$136 \pm 47$	$690 \pm 140$
25.0	$155 \pm 47$	$114 \pm 4$	$605 \pm 120$

не завдання. Як бачимо, декаметровий діапазон несе багато нової інформації, але, хоча кутова роздільна здатність УТР-2 на сьогодні найкраща в світі, однозначно інтерпретувати отримані результати вдається не завжди. Ця задача, ймовірно, буде під силу гігантським низькочастотним інструментам, що будуються зараз за проектами LOFAR, LWA, SKA та, вочевидь, новому радіотелескопу ГУРТ, який будується силами Радіоастрономічного інституту НАН України на території РАО С. Я. Брауде [26].



**Рис. 7.** Карті радіозображень ЗНН Петля Лебеда (Cygnus Loop) на частотах 25 МГц (верхня панель) і 12.6 МГц (нижня панель). Контури яскравості температур нанесені відповідно з кроком 5 і 20 кК. Заштрихованим еліпсом в лівому нижньому куті карт за рівнем 0.5 визначені кутові розміри ДС УТР-2. Галактичні координати ( $l$ ,  $b$ ) нанесені з кроком  $2^{\circ}$

### 3. Декаметрове радіовипромінювання позагалактичних об'єктів

Дослідження декаметрового радіовипромінювання позагалактичних об'єктів стосуються найбільшої у Всесвіті кількості об'єктів та найбільшої за часом і простором частини Всесвіту (мільярди років і мільярди світових років відповідно). Тому ці дослідження дуже важливі як для вивчення природи та фізичних параметрів самих об'єктів, так і для аналізу космологічних явищ у Всесвіті в цілому. До початку радіоастрономічних низькочастотних спостережень в Україні подібні роботи на вискоелективних радіотелескопах практично не виконувалися.



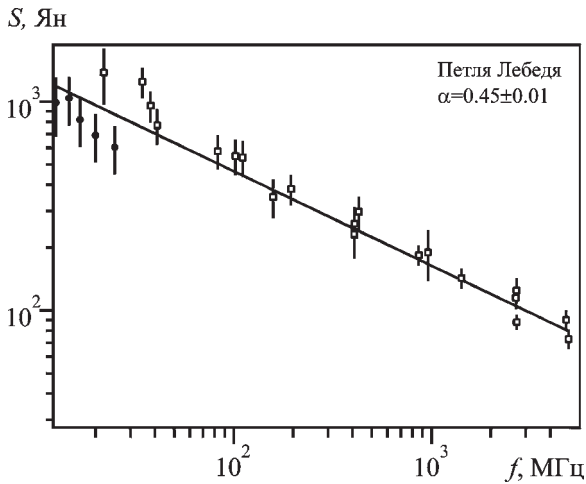


Рис. 8. Спектр ЗНН Петля Лебеда. Дані УТР-2 позначені чорними крапками

### 3.1. Позагалактичний фон

Радіоспостереження в безперервному спектрі забезпечують основну інформацію про великомасштабні властивості радіовипромінювання Галактики і Метагалактики. Повномасштабні огляди нашої галактичної системи дозволяють

вивчити просторові закономірності в розподілі безперервного радіовипромінювання, його великомасштабні неоднорідності типу гало та диска, шпурів і петель у широкому діапазоні частот, будувати моделі радіовипромінювання. Знання істинної просторової структури Галактики і спектрального складу дифузного космічного фону в широкому діапазоні частот дозволить, зокрема, при коректному урахуванні синхротронної складової Галактики і позагалактичного фону (радіояскравість становить від сотень до десятків тисяч кельвінів на частотах < 200 МГц) знайти слабкий (очікуваний рівень становить одиниці мілікельвінів) сигнал 21-см лінії водню, що виник у початковій епохи зародження Всесвіту ( $1100 > z > 5$ ) і є зміщеним внаслідок червоного зсуву в область низьких частот.

Головним джерелом позагалактичного радіофону, особливо в довгохвильовій частині радіодіапазону, є синхротронне випромінювання нерозділених позагалактичних радіоджерел, тобто джерел з інтенсивністю випромінювання, нижчою за поріг чутливості радіоогляду. Певний внесок дає і дифузне випромінювання, пов'язане

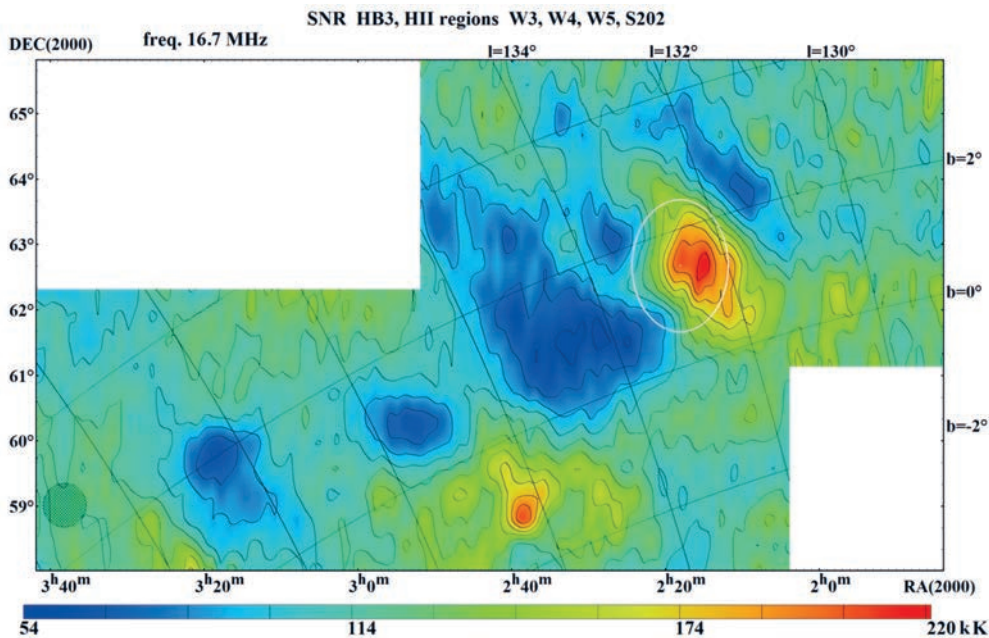


Рис. 9. Карта комплексу HB3\W3\W4\W5 і S202 на частоті 16.7 МГц. Чітко видно в випромінюванні протяжний ЗНН HB3 (білим кольором на карті позначена високочастотна границя залишку) і в поглинанні області HB: W4 ( $\alpha_{2000} = 2^{\text{h}}33^{\text{m}}$ ,  $\delta_{2000} = 61^{\circ}28'$ ), W5 ( $\alpha_{2000} = 2^{\text{h}}54^{\text{m}}$ ,  $\delta_{2000} = 60^{\circ}27'$ ), S202 ( $\alpha_{2000} = 3^{\text{h}}19^{\text{m}}$ ,  $\delta_{2000} = 59^{\circ}41'$ ). Заштрихованим еліпсом в лівому нижньому куті карти за рівнем 0.5 визначені кутові розміри ДС УТР-2. Галактичні координати ( $l, b$ ) нанесені з кроком  $2^{\circ}$

з великомасштабними позагалактичними структурами, міжгалактичним середовищем та випромінюванням кластерів, але цей внесок вважається незначним.

Вирішити проблему розділення усіх компонент – складових сумарної температури яскравості радіовипромінювання неба, можна за допомогою багаточастотних оглядів. Скориставшись такою перевагою УТР-2 як багаточастотність, ми застосували спеціальний Т–Т аналіз одночасно до всіх можливих поєднань пар частот, що дозволило визначити як температуру фонового позагалактичного випромінювання, так і його спектр без залучення будь-яких модельних припущень, а також визначити помилки рівня “нуля” на кожній частоті спостереження. Цей підхід був названий багаточастотним методом Т–Т діаграм [27].

Для вирішення поставленого завдання використовувалася багаточастотний радіоогляд частини Північного неба, одержаний на найбільшому у світі низькочастотному радіотелескопі УТР-2 (див. розділ 2.1). Для побудови Т–Т діаграм обрана ділянка з прямими сходженнями  $7^{\text{h}}45^{\text{m}} \div 8^{\text{h}}35^{\text{m}}$ , яка виділена на рис. 1 прямокутником. Ця область неба обрана не випадково – тут випромінювання виходить переважно з периферійних областей гало Галактики, немає заводових яскравих дискретних джерел і фонових особливостей, подібних до шпурів і петель. Крім того, вона розташована поблизу області мінімального радіовипромінювання Галактики і, з огляду на результати аналізу Т–Т діаграм, температурні залежності пар декаметрових частот апроксимуються на всьому її протязі прямою, без петель і перегинів. Отже, обрана ділянка є оптимальною для вирішення поставленого завдання – це високоширотна область Галактики ( $b \approx 30^\circ$ ) з постійним диференціальним спектральним індексом, де очікуваний внесок ізотропного позагалактичного фону у загальне випромінювання є максимальним і градієнт зміни температур (від 19 до 23 кК на частоті 25 МГц) є достатнім для коректної роботи Т–Т методу.

Для вказаної ділянки карти будувалися Т–Т графіки для всіх комбінацій пар частот, з яких відразу знаходились середні значення галактичного диференційного спектрального індексу  $\beta_G$  і зсуву  $I_E$  [27]. Визначивши ці величини, можна записати систему нелінійних рівнянь для частот УТР-2 – 14.7, 16.7, 20 і 25 МГц. Наближене рі-

шення цієї системи давало значення спектрального індекса позагалактичного фону  $\beta_E$  і чотири значення помилки рівня “нуля” для відповідних частот. Ці дані використовувалися для подальшого обчислення позагалактичної температури  $T_E$  на тих самих частотах. Середній диференціальний спектральний індекс радіовипромінювання Галактики на аналізованій ділянці неба становить  $\beta_G = 2.81 \pm 0.03$ . Середнє значення спектрального індексу позагалактичного фонового випромінювання складає  $\beta_E = 2.41 \pm 0.1$  у частотному діапазоні 14.7 ÷ 25 МГц. Знайдені значення яскравісної температури позагалактичного фону наведені у табл. 4 [27].

У цій таблиці наведені також значення яскравісної температури області мінімальної яскравості Північного неба. Від спостережених в огляді температур цієї області були відняті отримані яскравісні температури позагалактичного фону та визначена температура фону галактичного випромінювання області мінімальної яскравості (останній стовпчик табл. 4). Порівняння температур нетеплового фонового позагалактичного випромінювання показує перевищення інтенсивності позагалактичного фону над гало Галактики більш ніж удвічі на всіх частотах.

Отже, шляхом використання карти поблизу області мінімуму радіовипромінювання Північного неба з багаточастотного огляду у декаметровому діапазоні довжин хвиль були визначені яскравісні температури фонового позагалактичного випромінювання у діапазоні частот 12.6 ÷ 25 МГц методом багаточастотних Т–Т діаграм. Лише завдяки високій чутливості УТР-2 (ефективна площа інструменту становить  $\approx 150000 \text{ м}^2$  на частоті 25 МГц) і високій для цього діапазону частот кутовій роздільній здатності

Таблиця 4. Яскравісна температура області мінімальної яскравості Галактики

Частота, МГц	Повна температура ділянки мінімальної яскравості, кК	Температура фону позагалактики, кК	Температура фону Галактики, кК
14.7	$60.2 \pm 4.0$	$41.7 \pm 6.0$	$18.5 \pm 7.3$
16.7	$43.7 \pm 3.0$	$30.6 \pm 4.2$	$13.1 \pm 5.1$
20.0	$27.7 \pm 2.0$	$19.5 \pm 3.6$	$8.2 \pm 4.2$
25.0	$15.8 \pm 1.0$	$11.6 \pm 2.6$	$4.2 \pm 2.8$

(30' на 25 МГц) вдалося розділити на компоненти дифузне випромінювання в області мінімальних температур Північної напівсфери неба. Використання багаточастотних Т–Т діаграм дозволило одночасно визначити і температуру, і спектральний індекс позагалактичного радіофону, а не тільки температуру шляхом підбору спектральних індексів, як робилося раніше.

Важливою перевагою методу багаточастотних Т–Т діаграм для визначення внеску позагалактичного радіофону у дифузне випромінювання неба є той факт, що його застосування не залежить від будь-яких модельних припущень про структуру Галактики. Цей результат буде використаний для виділення позагалактичної компоненти із загального випромінювання і побудови скоригованих карт радіовипромінювання Галактики та карт спектрального індексу за результатами огляду Північного неба на УТР-2. Метод багаточастотних Т–Т діаграм, що був впроваджений на УТР-2, буде корисним для визначення фонового позагалактичного випромінювання та коректного врахування усіх похибок у вже наявних і очікуваних багаточастотних радіооглядах.

### **3.2. Радіогалактики і квазари, каталог компактних позагалактичних радіоджерел, космологія**

Одним з основних завдань сучасної радіоастрономії є вивчення фізичних процесів, що відбуваються в компактних позагалактичних джерелах космічного радіовипромінювання, передусім в радіогалактиках, скупченнях галактик, квазарах, тобто найвіддаленіших об'єктах Всесвіту.

Вельми важлива інформація про механізми випромінювання, поглинання та розсіяння радіохвиль міститься у частотних спектрах космічних радіоджерел. Для з'ясування форми спектрів необхідно виміряти абсолютні щільності потоків випромінювання радіоджерел в діапазоні від декаметрових до міліметрових хвиль.

Наразі виявлено близько 2 мільйонів таких джерел. Зі збільшенням чутливості і роздільної здатності радіотелескопів їх число безперервно зростає.

Найповніші дані спостережень дискретних джерел отримано на метрових, дециметрових і сантиметрових хвилях у діапазоні  $38 \div 8000$  МГц. Водночас великий інтерес становлять вимірю-

вання фізичних параметрів джерел на хвилях декаметрового діапазону (на частотах  $< 30$  МГц). У цьому діапазоні особливо помітно проявляються дії різних механізмів випромінювання, поглинання та розсіяння радіохвиль. До таких механізмів відносяться поглинання радіовипромінювання в іонізованому водні НІІ, явище реабсорбції, колективні взаємодії у космічній плазмі і пов'язані з ними прискорення часток, деформація енергетичного спектра релятивістських електронів і низка інших процесів.

Одним з найважливіших завдань сучасної радіоастрономії є також визначення основних закономірностей великомасштабного розподілу об'єктів у Всесвіті і пошук космологічного ефекту обриву у просторовому розподілі найвіддаленіших об'єктів при червоних зміщеннях, які відповідають епосі їх початкового формування у ранньому Всесвіті.

Найчіткіше ефекти космологічної еволюції та закони просторового розподілу об'єктів повинні проявлятися під час аналізу експериментальних даних, отриманих саме на найнижчих частотах, де спостерігаються протяжні ізотропно-випромінюючі радіоджерела. Це пов'язано з тим, що через "висвічування" релятивістських електронів та їх дифузію у ході тривалої еволюції об'єктів і відповідного укрупнення спектрів саме "старі" джерела повинні спостерігатися насамперед на низьких частотах. Так, було показано, що існуючі експериментальні дані на частотах вище 400 МГц не дозволяють однозначно визначити характер просторового розподілу об'єктів у ранньому Всесвіті. Ці дані можуть бути узгоджені як з існуванням космологічного ефекту обриву у розподілі найвіддаленіших радіоджерел, так і з його відсутністю. При цьому слід підкреслити, що пошук цього космологічного ефекту протягом тривалого часу є найважливішою астрофізичною метою радіооглядів. Для вирішення цієї фундаментальної астрофізичної проблеми потрібен аналіз експериментальних даних, отриманих на дуже низьких частотах ( $\ll 100$  МГц).

З іншого боку, для дослідження законів власної еволюції позагалактичних об'єктів і визначення фізичних умов всередині різних компонент, що складають їх структуру, потрібен аналіз експериментальних даних, отриманих у максимально широкому діапазоні частот, включно з найнижчими. Так, неодноразово зазначалося, що



на відміну від яскравих компактних об'єктів (характерні температури  $\sim 10^{11} \div 10^{12}$  К і розмір  $\leq 1$  кпс), які спостерігаються на високих частотах, фізичні умови всередині протяжних радіоджерел та їх кутова структура повинні проявляти істотну залежність від параметрів навколишнього міжгалактичного середовища. При цьому, оскільки параметри останнього також значною мірою залежать від космологічної епохи, параметри протяжних джерел можуть бути використані як зонди для визначення фізичних умов у міжгалактичному середовищі за різних значень червоного зміщення.

До кінця 60-х рр. надійні радіоастрономічні дані у низькочастотному (декаметровому) діапазоні були відсутні. Крім значних труднощів, пов'язаних з побудовою великих радіотелескопів, необхідних для отримання адекватної чутливості та роздільної здатності, дослідження у цьому діапазоні істотно обмежені завадами від радіостанцій і впливом іоносфери. Завади у сотні та тисячі разів перевищують сигнали космічних джерел, а іоносфера викликає як систематичні, так і нерегулярні зміни координат, рівня і форми сигналів. Прийом слабких сигналів на низьких частотах, на відміну від прийома на коротших хвилях, помітно обмежується високою температурою (від десятків до сотень тисяч кельвінів) декаметрового випромінювання фону Галактики.

Проте саме створення радіотелескопа УТР-2 дозволило по-новому підійти до вирішення найважливіших проблем позагалактичної астрономії і космології методами низькочастотної (декаметрової) радіоастрономії.

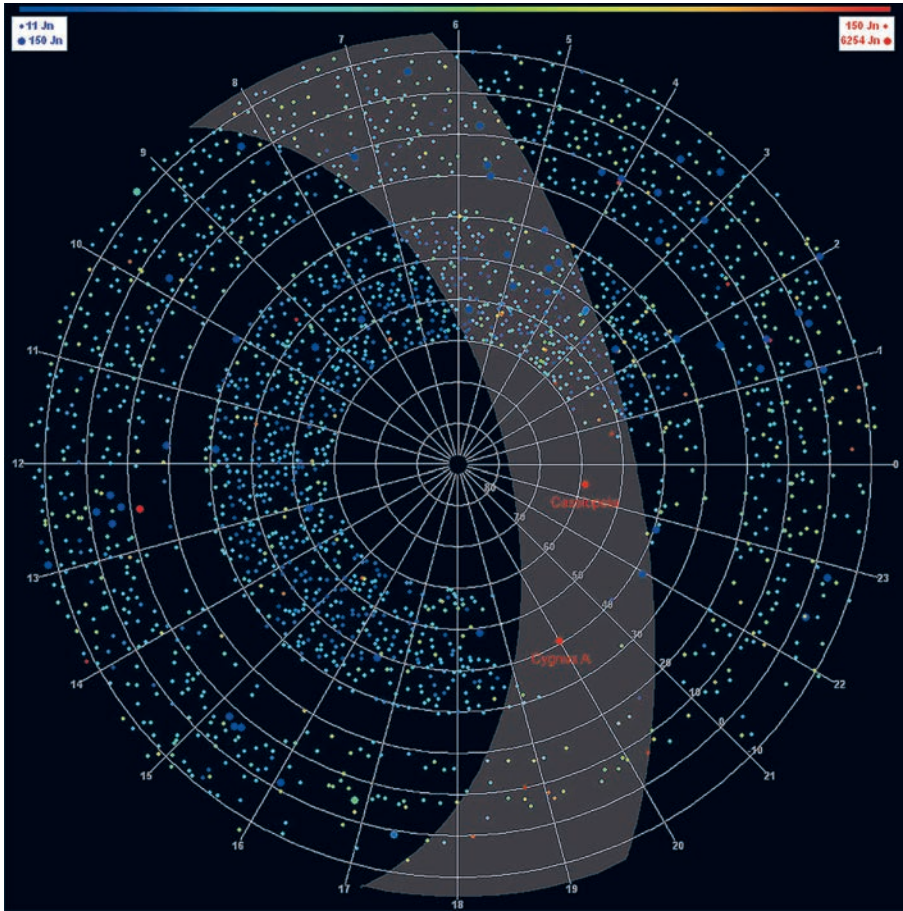
Регулярні сеанси спостережень для створення каталогу були розпочаті у 70-х рр. Аби оптимально використати спостережний час на УТР-2, вся небесна півсфера була розбита на смужки за схиленням. Ширина смужки –  $10^\circ$ . Для набору достатньої статистики для кожної смужки потрібно близько 5 років спостережень. За цей час були отримані і оброблені дані щодо наступних смужок:  $-10^\circ \div 0^\circ$ ,  $0^\circ \div +10^\circ$ ,  $+10^\circ \div +20^\circ$ ,  $+30^\circ \div +40^\circ$ ,  $+40^\circ \div +50^\circ$ ,  $+50^\circ \div +60^\circ$ . За час проведення радіоогляду виявлено та визначено параметри 2300 дискретних радіоджерел. Наразі завершені спостереження і виконується обробка смужки  $+20^\circ \div +30^\circ$  та розпочато спостереження смужки  $+60^\circ \div +90^\circ$  із застосуванням реєструю-

чої апаратури нового покоління і прискореної методики спостережень [28].

На рис. 10 показано положення на небі дискретних джерел із каталогу УТР-2 на сьогодні. Яскравість кольору індивідуального джерела відповідає щільності потоку його випромінювання. Затінена область – диск Галактики,  $|b| < 15^\circ$ .

Результат обробки даних радіоогляду – таблиця джерел (каталог) із зазначенням вимірних параметрів. Для кожного виявленого джерела наводяться наступні параметри: координати та щільність потоку випромінювання, виміряна на 6 частотах (10, 12.6, 14.6, 16.7, 20 і 25 МГц). Наводиться також усереднена щільність потоку на частоті 16.7 МГц; спектральний індекс, обчислений за інтерполяції декаметрового діапазону степеневую залежністю; кількість сеансів, в яких це джерело було успішно виявлено; помилки вимірювань; інтегральний показник надійності визначення параметрів і ототожнення з джерелами з інших каталогів [29]. Весь каталог послідовно опублікований в журналі *Astrophysics and Space Science* і виставлений на сайті Радіоастрономічного інституту НАН України в електронному вигляді <<http://www.ri.kharkov.ua>>.

Наявні результати огляду дискретних джерел Північного неба на радіотелескопі УТР-2 доводять високу інформативність низькочастотної радіоастрономії і сприятливі перспективи її розвитку. Отриманий унікальний каталог радіоджерел є надійною основою для подальшого астрофізичного аналізу, побудови фізичних і космологічних моделей. Для кожного джерела, виявленого і ототожненого з джерелами з каталогів, створених за спостереженнями в більш високочастотних діапазонах, побудовані спектри в широкому діапазоні частот [30]. Більшість радіоджерел мають степеневий спектр у всьому діапазоні радіочастот. Це підтверджує універсальний механізм синхротронного радіовипромінювання в широкому діапазоні енергій релятивістських електронів, розподілених за степеневим законом. Однак в спектрах деяких джерел зустрічаються злами. У цих випадках спектр є степеневим лише на окремих ділянках діапазону. Для автоматизації побудови спектрів був розроблений алгоритм класифікації, визначення зламів і параметрів степеневі залежності для кожної ділянки. Подібні спектри промовляють про складну багатокomпонентну структуру ра-



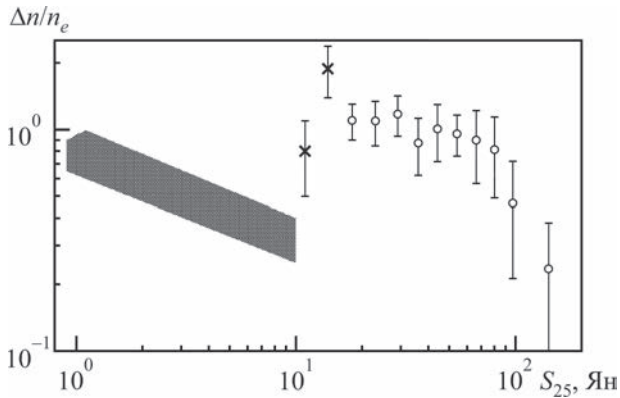
**Рис. 10.** Положення на небі дискретних радіоджерел із каталогу УТР-2. Яскравість палітри і розмір значка індивідуального точкового радіоджерела пропорційні щільності потоку його випромінювання. Затіненою ділянкою показано диск Галактики завтовшки  $15^\circ$

діоджерел, що відображає їх еволюцію і взаємодію з навколишнім міжгалактичним середовищем.

Статистичний аналіз каталогу дозволив також вперше виявити ефект зменшення просторової щільності найвіддаленіших радіоджерел, що пов'язано з епохою їх формування і безпосередньо відображає ефекти космологічної еволюції. Вперше такий аналіз був виконаний на УТР-2 К. П. Соколовим [31, 32], потім висновки цього аналізу були уточнені з урахуванням даних про нові радіоджерела, які поповнили каталог. Наприклад, підрахунок всіх наявних нині у каталозі джерел в залежності від потоку випромінювання, так звана залежність  $N(S)$ , дає дуже цікавий і важливий результат. Показано (див. рис. 11), що для діапазону щільностей потоку  $S = 20 \div 80$  Ян залежність  $N(S)$  збігається з даними для високих частот, тоді як число потужних джерел зменшується залежно від потоку помітно швидше.

Така відмінність – відсутність джерел з великими та зі слабкими потоками, відображає сильні еволюційні ефекти для віддалених, старих, потужних джерел і для відносно близьких і слабких джерел з крутими спектрами. Аналіз підрахунку джерел на частоті 25 МГц дозволяє припустити існування зменшення просторової щільності найвіддаленіших протяжних радіоджерел. А з огляду на подібність в загальній картині космологічної еволюції радіоджерел різної морфології, результат, отриманий для протяжних джерел на дуже низьких частотах, вказує на існування обриву в просторовому розподілі за червоним зміщенням для всіх класів позагалактичних джерел.

Подальший аналіз даних каталогу, що виконується співробітниками Радіоастрономічного інституту і астрофізиками інших країн (каталог доступний всьому світу), дозволить виявити нові



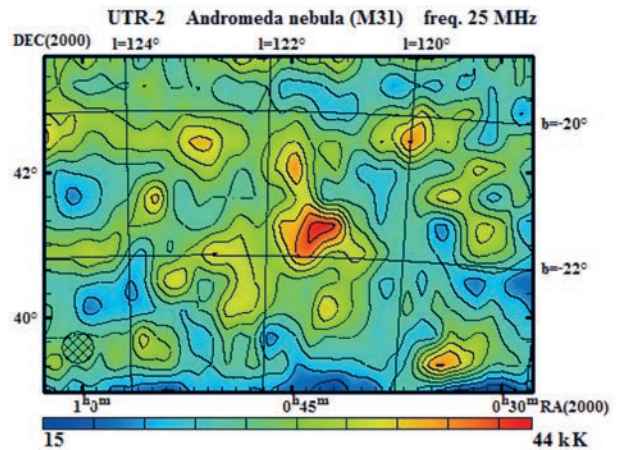
**Рис. 11.** Результати підрахунку джерел на частоті 25 МГц, нормалізовані на евклідове розподілення джерел ( $\Delta n/\Delta n_e$ ) для всіх каталогів УТР-2. Заштрихована ділянка відповідає довірчій області для джерел, що сплутуються. Дані в діапазоні щільності потоків від 20 до 80 Ян відповідають степеневій залежності з показником 1.84. Середні скориговані значення  $N_{25}(S)/N_e(S)$  для джерел з потоками  $10 \div 20$  Ян показані знаком  $\times$  через їх більшу статистичну невизначеність [31]

ефекти і закономірності. Створений каталог, що продовжує поповнюватися, може бути використаний також у формуванні оглядових програм й інтерпретації результатів оглядів гігантських низькочастотних радіотелескопів нового покоління LOFAR, LWA та SKA і низькочастотних космічних місій.

Ми не оминули увагою і такі відносно протяжні для променя УТР-2 позагалактичні об'єкти, як найближча, схожа на нашу, нормальна спіральна галактика типу Sb Туманність Андромеди (M31, NGC224) і скупчення галактик Coma і A2255. Тут ми вперше для широкого читача наводимо карти цих трьох радіоджерел та деякі їх фізичні характеристики (див. рис. 12–14).

Перші радіоспостереження Туманності Андромеди були виконані на початку 50-х рр. минулого століття. Вони показали, що галактика складається з двох підсистем – диска та сфероїдальної радіокорони або гало. Наступні численні роботи то спростовували, то підтверджували наявність у цієї галактики гало.

На УТР-2 спостереження M31 виконувалися протягом двох циклів в 1982 і 1984 рр. на традиційних п'яти частотах від 12.6 до 25 МГц в п'ятипроменевому режимі. Оскільки M31 виявилася відносно слабким радіоджерелом в декаметровому діапазоні, для надійного визначення рівня фону число реалізацій було доведено до



**Рис. 12.** Карта радіозображення галактики Туманність Андромеди (M31) на частоті 25 МГц. Контури яскравості температур нанесені з кроком 3 кК. Заштрихованим еліпсом в лівому нижньому куті карти за рівнем 0.5 визначені кутові розміри ДС УТР-2. Галактичні координати ( $l, b$ ) нанесені з кроком  $2^\circ$

50 для кожного скана. В результаті випадкова помилка середнього рівня фону не перевищувала 3 %.

Зі спостережень випливає, що гало навколо диска M31 існує і розміри цієї протяжної структури (еліпсоїд обертання з великою віссю  $240'$ , ексцентриситет 0.3) на декаметрових хвилях зменшуються уздовж великої осі симетрично щодо центру. Така поведінка є додатковим аргументом на користь існування гало, через те що свідчить про його зв'язок з галактикою. У табл. 5 наведено щільності потоків випромінювання диска і гало M31.

Оскільки існують труднощі обліку дискретних джерел в картинній площині галактики і помітний вплив через бокові пелюстки ДС потужного радіоджерела Кассіопея А на частоті 25 МГц, точність визначення потоків випромінювання компонент M31 відносно невелика і складає близько 40 %. За характером спектра (див. табл. 5) і результатом аналізу радіозображень на декаметрових хвилях видно, що випромінювання Туманності Андромеди зазнає поглинання. Реєстроване нами поглинання не можна повністю пояснити наявністю дифузного водню та видимими хмарами НІІ, що фіксуються на більш високих частотах. Вважаємо ймовірним, що в M31 присутня поглинаюча матерія, яка має кільцеподібну структуру. Це кільце відповідає



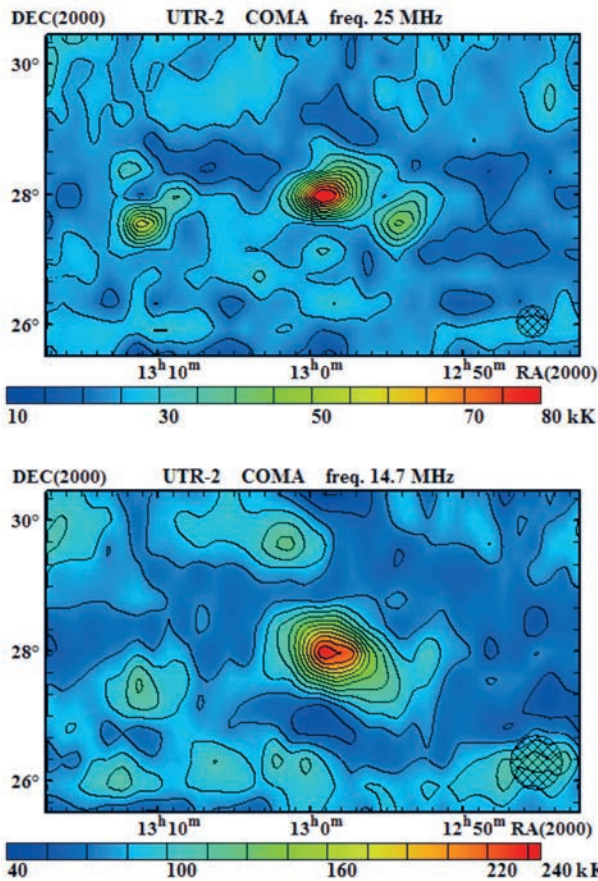


Рис. 13. Карти радіозображень скупчення галактик Сомы на частотах 25 і 14.7 МГц. Контури яскравості температур нанесені з кроками 5 і 15 кК відповідно. Заштрихованим еліпсом в правому нижньому куті карт за рівнем 0.5 визначені кутові розміри ДС УТР-2

оболонці НІ, утвореної еліпсоїдом обертання з великою віссю М31 розміром 140', ексцентриситетом 0.3, товщиною 30' та концентрацією теплових електронів  $0.07 \text{ см}^{-3}$ . Спектральний індекс випромінювання гало в діапазоні  $16.7 \div 408 \text{ МГц}$  визначено як  $\beta_g = 2.85 \pm 0.07$ , а диска Туманності Андромеди –  $\beta_d = 2.65 \pm 0.06$ . Слід зазначити, що спектральний індекс гало нашої Галактики ( $\beta_G = 2.81 \pm 0.03$ ), отриманий нами за картами огляду Північного неба на УТР-2 в області мінімальної яскравості (див. розділ 2.1), та спектральний індекс гало Туманності Андромеди практично співпадають, що свідчить про однотипність цих об'єктів.

Аналогічний результат отриманий за спостереженнями на УТР-2 набагато віддаленіших і масштабних об'єктів, таких як скупчення галактик. Характерною особливістю радіовипро-

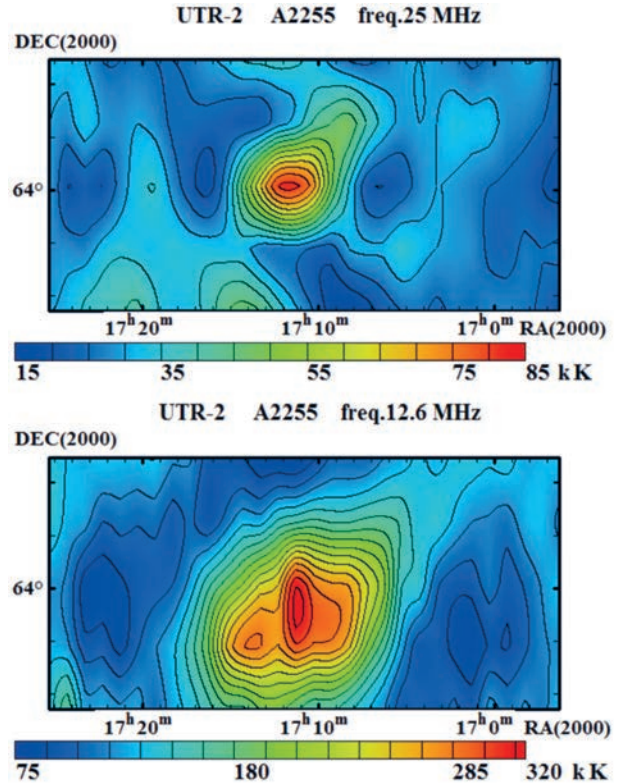


Рис. 14. Карти радіозображень скупчення галактик А2255 на частотах 25 і 12.6 МГц. Контури яскравості температур нанесені з кроками 5 і 15 кК відповідно

Таблиця 5. Щільності потоків випромінювання диска та гало Туманності Андромеди

Частота, МГц	Щільність потоку диска, Ян	Щільність потоку гало, Ян
14.7	61	116
16.7	82	167
20.0	67	143
25.0	65	102

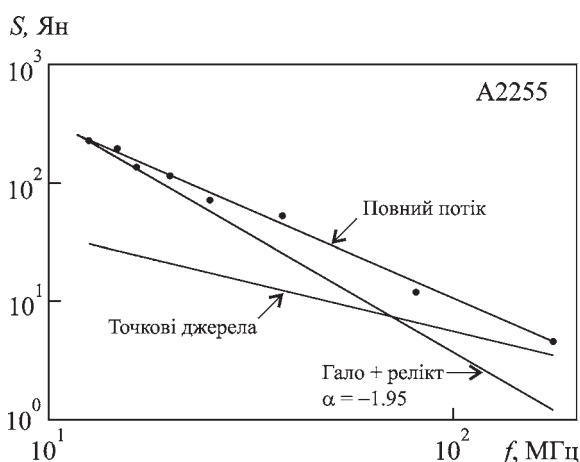
мінювання цих об'єктів на декаметрових хвилях також є наявність випромінювання гало та радіореліктів з крутими спектрами, яке превалює над випромінюванням інших радіоджерел, що складають скупчення. Радіорелікти – це дифузні, подовжені радіоджерела синхротронного походження. Вони зустрічаються у вигляді вражаючих одиночних або подвійних симетричних дуг мегапарсекових розмірів на периферіях скупчень галактик. Як і радіогало, вони не мають явного аналога будь-якої галактики з цього скупчення, але їх форми набагато витягнутіші та неправиль-

ні порівняно з формами радіогало, ще і з натакми на розподіл випромінюючих електронів різного віку по всій протяжності випромінювальної області.

Так, для скупчення Coma основна частка декаметрового випромінювання припадає на радіорелікти, тоді як для A2255 – на суму реліктів і гало. На рис. 15 показано спектр повного випромінювання A2255 з урахуванням наших даних, а також спектри дискретних радіоджерел скупчення та сумарний спектр випромінювання гало + релікт, отримані на високих частотах і апроксимовані до декаметрових хвиль. Як видно зі спектрів, в середньому близько 85 % випромінювання A2255 в декаметровому діапазоні походить від гало і реліктів.

Слід зазначити, що всі наведені вище результати були отримані за допомогою старої приймально-реєструючої апаратури. З впровадженням на УТР-2 двоканальних цифрових реєстраторів нового покоління DSP-Z [33] стало можливим виконувати спостереження відразу у всій смузі робочих частот ( $8 \div 32$  МГц) з часовим розділенням 0.25 мс, частотною роздільною здатністю 4 кГц, динамічним діапазоном 90 дБ (на п'ять порядків більше, ніж у старих радіометрів!), що кардинально полегшує боротьбу зі станційними завадами, підвищує чутливість і достовірність даних, скорочує необхідний час спостережень.

Наприклад, під час картографування великомасштабної структури Галактики (див. розділ 2)



**Рис. 15.** Спектр скупчення галактик A2255: верхня пряма – повний спектр на частотах  $12.6 \div 178$  МГц, нижні прямі – усереднений спектр всіх точкових джерел скупчення та сумарний спектр гало і релікта скупчення за даними на високих частотах

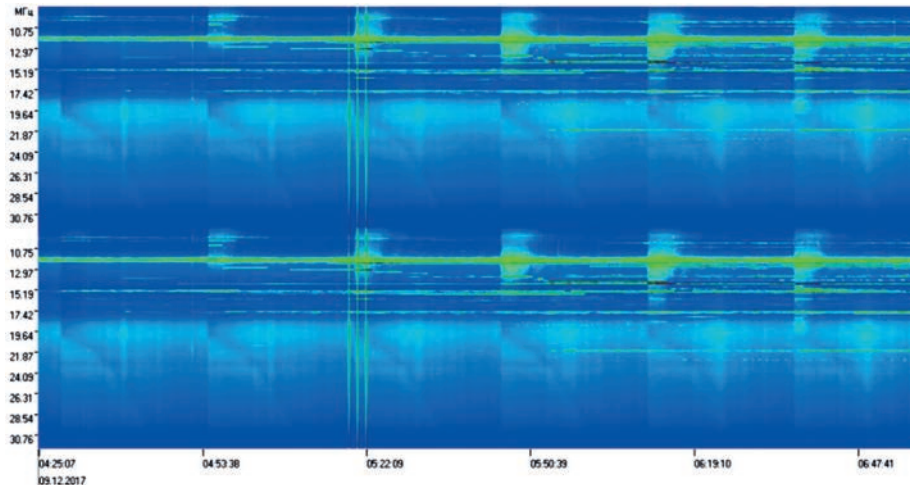
спостереження були виконані на старій приймальній апаратурі з динамічним діапазоном не більше 40 дБ в вузьких смугах (40 і 10 кГц), і, незважаючи на адекватне відтворення великомасштабної структури радіовипромінювання фону на картах, нам не вдалося повністю позбутися завад і виконати надійний спектральний аналіз фону, особливо на частотах нижче 16.7 МГц.

Наразі ми повторюємо ці спостереження за допомогою нових цифрових реєстраторів DSP-Z. Картографування за допомогою однієї секції антени П-П і однієї секції антени “Захід–Схід” (3-С) УТР-2 здійснюється скануванням неба в меридіональній площині в межах схилень  $-40^\circ \div +85^\circ$  з кроком  $2^\circ$  (один скан охоплює  $100^\circ$ -й інтервал схилень і триває 25 хв). За цих умов в кожному сеансі спостережень на частотах  $< 19$  МГц і схиленнях  $< 20^\circ$  регулярно фіксується рівномірне дифузне випромінювання, що перевищує фонове іноді на 20 дБ (!) (див. рис. 16).

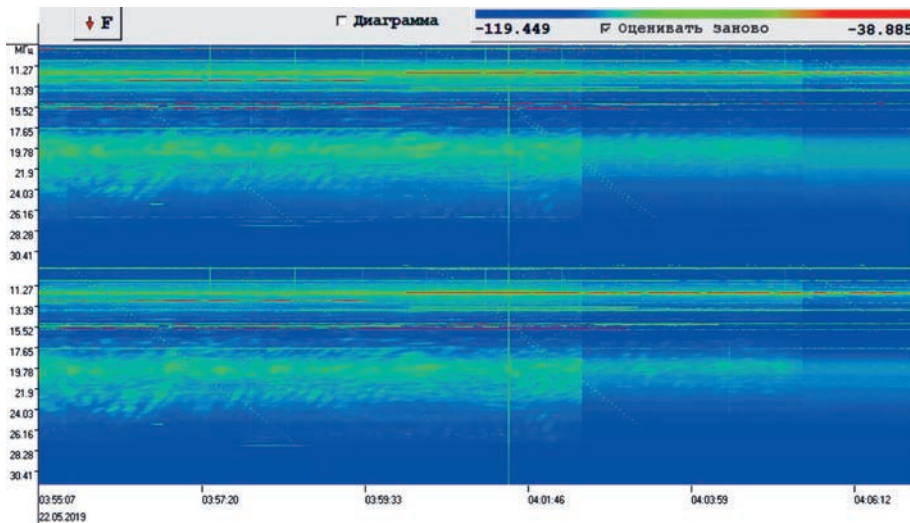
На рис. 16 видно, що відсутнє на першому скані низькоширотне радіовипромінювання досить різко з’являється на другому, початок якого збігається з локальним часом сходу Сонця, і в наступних сканах інтенсивність випромінювання зростає. У процесі спостережень виявлена особливо хороша кореляція зі сходом Сонця, зазвичай різке підняття інтенсивності цього низькочастотного фону починається за  $10 \div 30$  хв до моменту локального часу сходу, тоді як захід Сонця менш виражений і загасання низькоширотного радіовипромінювання триває набагато довше. Проте той факт, що випромінювання відсутнє на частотах  $> 20$  МГц, змушує припустити, що спектральний індекс цього випромінювання дуже крутий, а такий обрив і крутизна спектра є неспівставними з відомими на цей час космічними радіоджерелами та явищами.

Часом це однорідне випромінювання стає дуже структурованим з безліччю особливостей і деталей, насамперед влітку на заході та сході Сонця (див. рис. 17).

Аби вивчити феномен низькоширотного дифузного випромінювання та його динаміку була виконана низка добових сеансів спостережень в режимі “транзит”. ДС секцій нерухомо спрямовувалася в меридіональній площині на південь або північ з великими зенітними кутами, і за рахунок обертання Землі реєструвалася добова зміна радіояскравості неба. Як приклад,



**Рис. 16.** Динамічний спектр радіовипромінювання останніх 6 сканів типового сеансу спостережень при картографуванні великомасштабної структури Північного неба. Показані спектри на виході секцій № 1 і № 2 антени П-П УТР-2 в передранкові години. Вказано всесвітній координований час UTC



**Рис. 17.** Динамічний спектр радіовипромінювання передостаннього скану спостережень 21–22.05.2019 р. за допомогою секцій № 9 (верхня половина) і № 10 (нижня половина) антени 3–С УТР-2. Вказано всесвітній координований час UTC

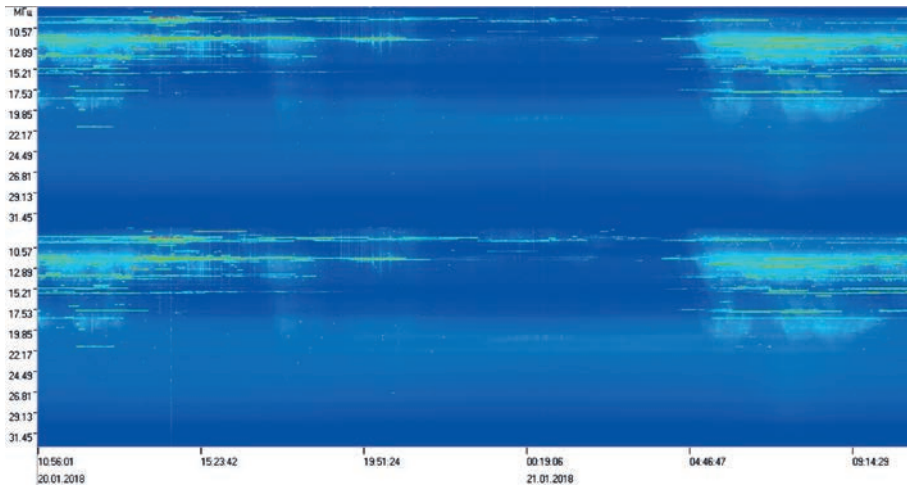
на рис. 18 і 19 показані динамічні спектри цих спостережень в напрямку на південь і північ відповідно.

Аналіз цих та інших транзитних сеансів показує, що дифузне низькоширотне випромінювання вкрай неоднорідне на великих часових інтервалах і не повторюється з дня на день. Іноді реєструються структури, що нагадують спорадичне випромінювання Юпітера, Сонця, причому такі структури реєструються в напрямках і на південь, і на північ (див. рис. 20, 21).

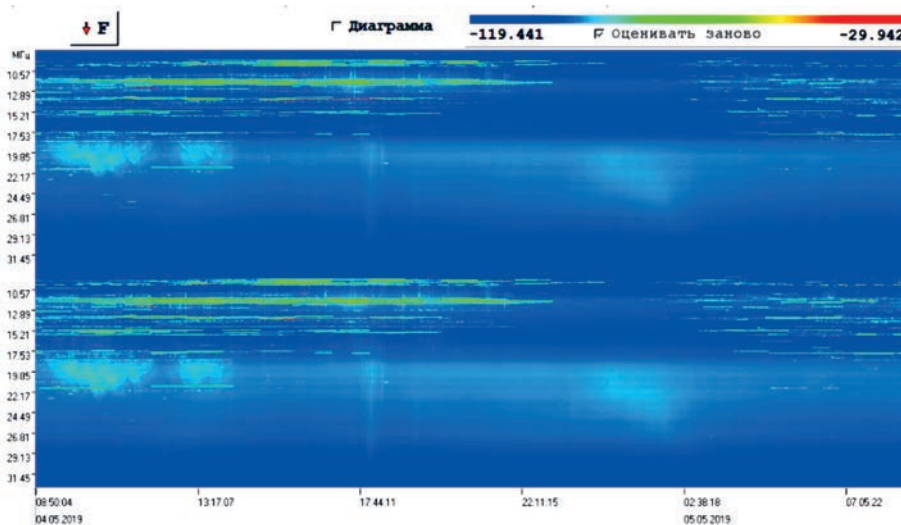
Отже, все промовляє про земне походження цього феномена, але джерело і причина поки

що невідомі. Найімовірніше, причиною такого випромінювання може бути взаємодія сонячного випромінювання з земною іоносферою, і воно реєструється тільки тоді, коли промінь зору радіотелескопа перетинає певний досить товстий шар іоносфери. Не можна виключати і космічні промені, які, як відомо, породжують в земній атмосфері так звані “широкі атмосферні зливи”, гальмівне випромінювання яких найінтенсивніше реєструється в діапазонах довгих і середніх радіохвиль. Вельми вірогідною природою такого випромінювання може бути блискавкова активність у тропічних широтах. Відомо, що у цих





**Рис. 18.** Сеанс добових спостережень 20–21.01.2018 р. за допомогою секцій № 3 та № 1 антени П–П УТР-2 в напрямку на південь ( $\delta = -30^\circ$ , зенітний кут  $70^\circ$ ) в режимі “транзит”. Вказано всесвітній координований час UTC



**Рис. 19.** Сеанс добових спостережень 04–05.05.2019 р. за допомогою секцій № 9, № 10 антени З–С УТР-2 в напрямку на північ (зенітний кут  $80^\circ$ ) в режимі “транзит”. Вказано всесвітній координований час UTC

областях народжується близько 100 блискавок за секунду. За сталої накопичення понад 10 мс вони можуть інтегруватись приймачами і виглядати як квазіфоновий сигнал.

#### 4. Висновки

Головні результати досліджень в континуумі на радіотелескопі УТР-2 протягом 50 років можна підсумувати наступним чином.

Розроблено методи, алгоритми та пакет програм з інтерфейсом користувача для побудови карт за спостереженнями у континуумі на радіотелескопі УТР-2. Отримано карти значної части-

ни Північного неба з рекордною чутливістю та просторовою роздільною здатністю на декаметрових хвилях.

Отримано карти всіх областей НП Північної півкулі, які мають кутові розміри більше  $1^\circ$ . Оцінено оптичні товщини, міри емісії та кінетичні температури областей НП, визначена теплова структура туманностей. За цими спостереженнями вперше вдалося оцінити відношення напруженостей магнітного поля в місцевому рукаві Оріона та в міжрукавному просторі, а також об’ємну щільність нетеплового радіовипромінювання Галактики.

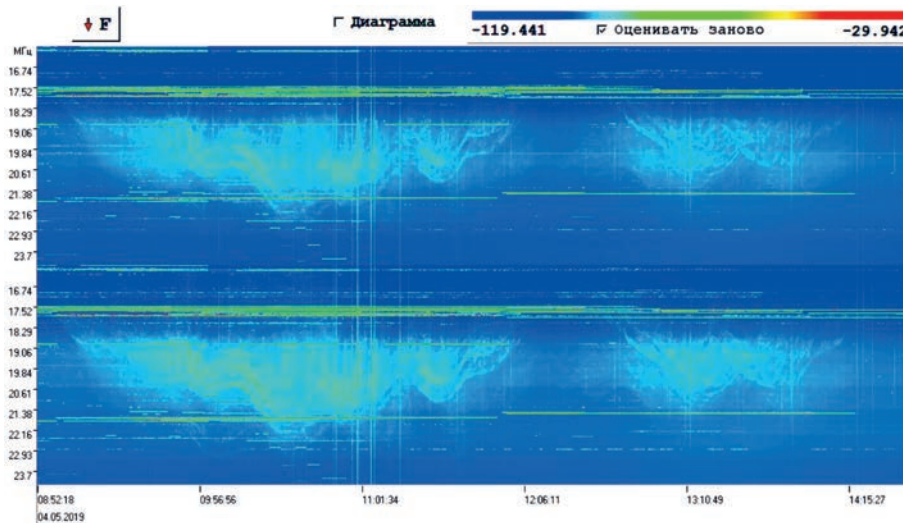


Рис. 20. Фрагмент динамічного спектру радіовипромінювання, наведеного на рис. 19. Вказано всесвітній координований час UTC

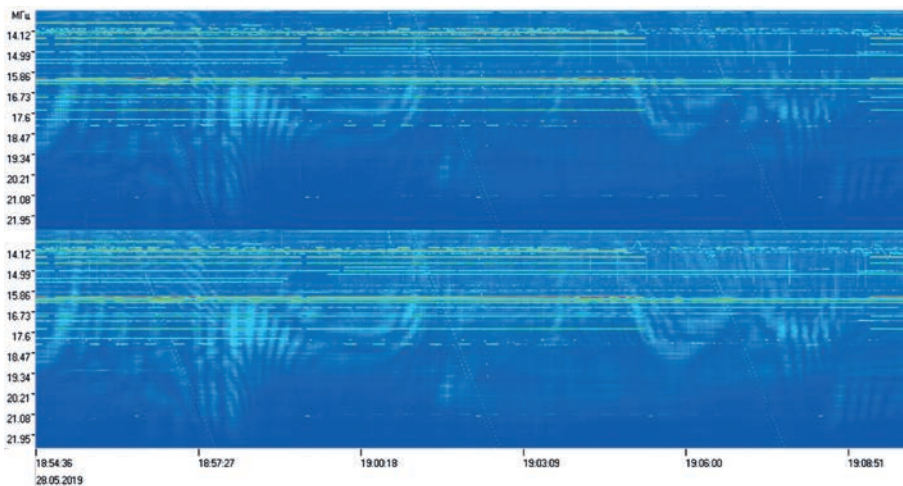


Рис. 21. Фрагмент динамічного спектру радіовипромінювання, отриманого за допомогою секцій № 9 (верхня половина) і № 10 (нижня половина) антени 3–С УТР-2 в напрямку на північ (зенітний кут  $80^\circ$ ) 28.05.2019 р. Вказано всесвітній координований час UTC

Отримано декаметрові карти понад 20 ЗНН. Виявлено, що всі, крім одного, мають завал спектра на декаметрових хвилях. За характером завалу було визначено місце розташування в просторі на промені зору теплової матерії, що викликала поглинання нетеплового випромінювання ЗНН. Запропоновано гіпотезу існування реліктової зони іонізованого водню навколо ЗНН.

Розроблено метод багаточастотних Т–Т діаграм, який був застосований до огляду Північного неба, виконаного на радіотелескопі УТР-2. Вперше незалежним методом вдалося розділити на компоненти дифузне космічне радіовипромі-

нювання і визначити ізотропну позагалактичну температуру та її спектральний індекс.

Підтверджено перевищення інтенсивності позагалактичного фону над інтенсивністю випромінювання всіх каталогізованих на цей час дискретних радіоджерел, навіть з урахуванням протяжних компонентів низької поверхневої яскравості. Цей експериментальний факт наразі не має пояснення і є викликом для сучасної астрофізики.

Створено найповніший на декаметрових хвилях каталог близько 2300 дискретних радіоджерел з рекордною чутливістю і кутовою розділь-

ною здатністю для більшої частини Північного неба.

Отримано широкосмугові спектри, визначено координати, просторовий розподіл та виконано ототожнення більшості каталогізованих об'єктів. Вказано на існування обриву в просторовому розподілі за червоним зміщенням для всіх класів позагалактичних джерел.

Підсумовуючи, зазначимо також, що у процесі спостережень виявлені такі особливості низькоширотного декаметрового дифузного випромінювання:

- практично відсутнє на частотах вище 20 МГц, особливо в нічний час;

- різко обривається на кутах схилень, більших за  $10^\circ \div 20^\circ$ ;

- очевидна добова кореляція інтенсивності вдень і вночі;

- повна декореляція з великомасштабною структурою Галактики і Метагалактики, відомою зі спостережень на більш високих частотах;

- нестационарність інтенсивності – з тих самих напрямків на небі в різні сеанси спостережень реєструється різна інтенсивність і структура.

Звісно, виявлення низькоширотного декаметрового дифузного випромінювання є новою, самостійною, цікавою і важливою науковою задачею. Стосовно ж картографування космічного фону або будь-яких інших суто радіоастрономічних континуальних досліджень на частотах нижче 20 МГц в напрямках зенітних кутів більших за  $40^\circ$  це випромінювання є серйозною перешкодою. Проте стає очевидним, що для отримання якісних карт великомасштабної структури всього доступного для УТР-2 неба, вільних від будь-яких земних впливів, потрібно набагато більше виключно нічних спостережень. Це передусім стосується “найцінніших” частот (нижче 20 МГц), на яких поки що жоден радіотелескоп у світі, крім УТР-2, не здатний отримати якісні карти Північного неба.

Як бачимо, УТР-2 далеко не вичерпав свої можливості, і нас чекають нові цікаві та важливі результати, зокрема і в дослідженнях континуального декаметрового радіовипромінювання.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Коноваленко О. О., Захаренко В. В., Литвиненко Л. М., Ульянов О. М., Сидорчук М. А., Стьопкін С. В., Шепелев В. О., Зарка Ф., Рукер Г. О., Лекашо А., Панченко М., Брук Ю. М., Токарський П. Л., Бубнов І. М., Єрін С. М., Колядін В. Л., Мельник В. М., Калініченко М. М., Станіславський О. О., Доровський В. В., Христенко О. Д., Шевченко В. В., Белов О. С., Грідін А. О., Антонов О. В., Бовкун В. П., Резніченко О. М., Борцов В. М., Квасов Г. В., Остапченко Л. М., Шевчук М. В., Шевченко В. А., Яцків Я. С., Вавілова І. Б., Брауде І. С., Шкуратов Ю. Г., Рябов В. Б., Підгорний Г. І., Тимошевський А. Г., Литвиненко О. О., Галанін В. В., Рябов М. І., Браженко А. І., Ващишин Р. В., Французенко А. В., Кошовий В. В., Івантишин О. Л., Лозінський А. Б., Харченко Б. С., Васильєва Я. Ю., Кравцов І. П., Васильківський Є. В., Литвиненко Г. В., Муха Д. В., Василенко Н. М., Шевцова А. І., Мірошніченко А. П., Кугай Н. В., Соболев Я. М., Цвик Н. О. Засновнику декаметрової радіоастрономії в Україні академіку НАН України Семену Яковичу Брауде 110 років: історія створення та розвитку вітчизняної експериментальної бази протягом останнього півстоліття. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2021. Т. 26, № 1. С. 5–73. DOI: 10.15407/rpra26.01.005

2. Melnik V. N., Konovalenko A. A., Dorovskyy V. V., Lecaheux A., Rucker H. O., and Shevchuk M. V. Exploration of the solar decameter radio emission with the UTR-2 radio telescope. *Radio Phys. Radio Astron.* 2021. Vol 26, No. 1. P. 74–89. DOI: 10.15407/rpra26.01.074
3. Захаренко В. В., Рябов В. Б., Кравцов І. П., Милостна К. Ю., Харланова В. Ю., Васильєва Я. Ю., Ульянов О. М., Коноваленко О. О., Калініченко М. М., Зарка Ф., Рукер Г. О., Фішер Г., Єрін С. М., Грісмайер Ж.-М., Сидорчук М. А., Шевцова А. І., Скорик А. О., Шевченко В. А. Спорадичне радіовипромінювання космічних об'єктів на низьких частотах. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2021. Т. 26, № 2. С. 99–129. DOI: 10.15407/rpra26.02.099
4. Ульянов О. М. Історія низькочастотних досліджень пульсарів. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2021. Т. 26, № 2. С. 130–147. DOI: 10.15407/rpra26.02.130
5. Калініченко М. М., Кугай Н. В., Коноваленко О. О., Браженко А. І., Бубнов І. М., Єрін С. М., Рукер Г. О., Зарка Ф., Лекашо А., Івантишин О. Л., Литвиненко О. О., Романчук О. І., Французенко А. В. Дослідження мерехтінь радіовипромінювання космічних джерел на неоднорідностях міжпланетної плазми в радіоастрономічному інституті НАН України. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2021. Т. 26, № 2. С. 148–164. DOI: 10.15407/rpra26.02.148
6. Мірошніченко А. П. Густина середовища велетенської радіоструктури для галактик і квазарів з крутими радіоспектрами. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2021. Т. 26, № 2. С. 165–172. DOI: 10.15407/rpra26.02.165
7. Крымкин В. В. Спектр низькочастотного радиоизлучения фона. *Известия вузов. Радиофизика*. 1971. Т. 14, № 2. С. 199–203
8. Антонов А. В. Исследование радиоизлучения космического фона на частоте 10 МГц. *Известия вузов. Радиофизика*. 1973. Т. 16, № 5. С. 759–761.
9. Hamilton P. A. and Haynes R. F. Observations of the southern sky at 10.02 MHz. *Aust. J. Phys.* 1968. Vol. 21, Is. 6. P. 895–902. DOI: 10.1071/RH680895
10. Жук И. Н. Распределение радиояркости галактического фона в декаметровом диапазоне радиоволн. *Известия вузов. Радиофизика*. 1973. Т. 16, № 5. С. 754–757.



11. Turtle A. J., Pugh J. F., Kenderdine S., and Pauliny-Toth I. I. K. The Spectrum of the Galactic Radio Emission: I. Observations of Low Resolving Power. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 1962. Vol. 124, Is. 4. P. 297–312. DOI: 10.1093/mnras/124.4.297
12. Bridle A. H. and Baldwin J. E. The Spectrum of the Radio Background Between 13 and 404 MHz. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 1967. Vol. 136, Is. 2. P. 219–240. DOI: 10.1093/mnras/136.2.219
13. Ellis G. R. A. Galactic Radio Emission Below 16–5 MHz and the Galactic Emission Measure. *Aust. J. Phys.* 1982. Vol. 35, Is. 1. P. 91–104. DOI: 10.1071/PH820091
14. Mathewson D. S., Broten N. W., and Cole D. J. A survey of the Southern Sky at 30 Mc/s. *Aust. J. Phys.* 1965. Vol. 18, Is. 6. P. 665–668. DOI: 10.1071/PH650665
15. Caswell J. L. A Map of the Northern Sky at 10 MHz. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 1976. Vol. 177, Is. 3. P. 601–616. DOI: 10.1093/mnras/177.3.601
16. Roger R. S., Costain C. H., Landecker T. L., and Swerdlyk C. M. The radio emission from the Galaxy at 22 MHz. *Astron. Astrophys. Supp. Ser.* 1999. Vol. 137, Is. 1. P. 7–19. DOI: 10.1051/aas:1999239
17. Василенко Н. М., Муха Д. В., Сидорчук М. А., Сидорчук К. М. Построение и обработка радиокарт Северного неба по наблюдениям в континууме на радиотелескопе УТР-2. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2005. Т. 10, № 3. С. 244–253.
18. Krymkin V. V. Observations of the Rosette nebula NGC 2237 at decametric wavelengths. *Astrophys. Space Sci.* 1978. Vol. 54, Is. 1. P. 187–197. DOI: 10.1007/BF00637907
19. Abramenkov E. A. and Krymkin V. V. Parameters of the magnetic field in the local Galactic arm derived from low frequency absorption measurements in the ionized gas. *Galactic and Intergalactic Magnetic Fields. Proceedings of the 140th Symposium of IAU.* (June 19–23, 1989. Heidelberg, FRG) R. Beck, P. P. Kronberg, R. Wielebinski, eds. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publ, 1990. P. 49–53.
20. Krymkin V. V. and Sidorchuk M. A. Observation of the galactic anticentre region in the direction of PKS 0607+17 with the UTR-2 and RATAN-600 radio telescopes. *Astron. Astrophys.* 1988. Vol. 200. P. 185–190.
21. Сидорчук М. А., Абраменков Е. А. Остатки вспышек сверхновых HB3, 3C58 и IC443 в декаметровом диапазоне длин волн. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2006. Т. 11, № 2. С. 134–154.
22. Krymkin V. V. and Sidorchuk M. A. Decameter-wave observations of supernova remnant CTA 1. *Sov. Astron.* 1990. Vol. 34, No. 2. P. 197–200.
23. Абраменков С. А., Крымкін В. В., Сидорчук М. А. Залишок спалаху наднової “Петля Єдиногога” на декаметрових хвилях. *Доповіді АН УРСР*. 1982. № 3. С. 44–47.
24. Krymkin V. V., Sidorchuk M. A., and Abramenkov E. A. Decameter-wave investigation of the supernova remnant HB 9. *Sov. Astron.* 1988. Vol. 32. P. 634–638.
25. Кабанова Т. И., Крымкин В. В., Сидорчук М. А. Низкочастотные наблюдения остатка вспышки сверхновой HB 21. *Кинематика и физика небесных тел*. 1989. Т. 5, № 3. С. 44–49.
26. Коноваленко А. А., Ерин С. Н., Бубнов И. Н., Токарский П. Л., Захаренко В. В., Ульянов О. М., Сидорчук М. А., Степкин С. В., Гридин А. А., Квасов Г. В., Колядин В. Л., Мельник В. Н., Доровский В. В., Калинин Н. Н., Литвиненко Г. В., Зарка Ф., Дени Л., Жирар Ж., Руцер Х. О., Панченко М., Станиславский А. А., Христенко А. Д., Муха Д. В., Резниченко А. М., Лисаченко В. М., Борцов В. В., Браженко А. И., Васильева Я. Ю., Скорик А. А., Шевцова А. И., Милостная К. Ю. Астрофизические исследования с помощью малоразмерных низкочастотных радиотелескопов нового поколения. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2016. Т. 21, № 2. С. 83–131. DOI: 10.15407/rpra21.02.083
27. Vasilenko, N. M. and Sidorchuk M. A. Separation of galactic and extragalactic radio emission at decameter wavelengths. *Astrophys. Space Sci.* 2017. Vol. 362. id. 221. DOI: 10.1007/s10509-017-3202-0
28. Sidorchuk K. M., Konovalenko A. A., Rucker H. O., Lecacheux A., Denis L., Sidorchuk M. A., Rashkovsky S. L., Dorovsky V. V., and Zakharenko V. V. New Methods and Equipement of Decametric Radio Astronomy for Continuum Observation at the UTR-2 Radio Telescope. *Kinemat. Phys. Celest. Bodies.* 2005. Vol. 21, No. 5-suppl. P. 57–60.
29. Braude S. Ya., Rashkovsky S. L., Sidorchuk K. M., Sidorchuk M. A., Sokolov K. P., Sharykin N. K., and Zakharenko S. M. Decametric Survey of Discrete Sources in the Northern Sky. *Astrophys. Space Sci.* 2002. Vol. 280, Is. 3. P. 235–299. DOI: 10.1023/A:1015534108849
30. Брауде С. Я., Мирошниченко А. П., Рашковский С. Л., Сидорчук К. М., Сидорчук М. А., Шарыкин Н. К. Декаметровый обзор дискретных источников Северного неба. XIII Б. Спектры дискретных источников для интервала склонений 30°–40°. *Кинематика и физика небесных тел*. 2003. Т. 19, № 4. С. 291–306.
31. Sokolov K. P. Determination of the parameters of the spatial distribution of extragalactic radio sources observed in the decameter range –  $P(D)$  analysis at 25 MHz. *Sov. Astron.* 1988. Vol. 32, No. 2. P. 121–126.
32. Sokolov K. P. Analysis of the Astrophysical Significance of Radio Source Counts Obtained in Different Frequency Ranges. *Aust. J. Phys.* 1990. Vol. 43, No. 2. P. 263–269. DOI: 10.1071/PH900263
33. 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 I., Mylostna K., Shevtsova A., Skoryk A., Kravtsov I., Volvach Y., Plakhov M., Vasilenko N., Vasykivskiy 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., Cofre A., and Griebmeier J.-M. Digital Receivers for Low-Frequency Radio Telescopes UTR-2, URAN, GURT. *J. Astron. Instrum.* 2016. Vol. 5, Is. 4. id. 1641010. DOI: 10.1142/S2251171716410105

## REFERENCES

1. KONOVALENKO, O. O., ZAKHARENKO, V. V., LYTUVY-NENKO, L. M., ULYANOV, O. M., SIDORCHUK, M. A., STEPKIN, S. V., SHEPELEV, V. A., ZARKA, P., RU-

- CKER, H. O., LECACHEUX, A., PANCHENKO, M., BRUCK, YU. M., TOKARSKY, P. L., BUBNOV, I. M., YERIN, S. M., KOLIADIN, V. L., MELNIK, V. M., KALINICHENKO, M. M., STANISLAVSKY, O. O., DOROVSKYY, V. V., KHRISTENKO, O. D., SHEVCHENKO, V. V., BELOV, O. S., GRIDIN, A. O., ANTONOV, O. V., BOVKUN, V. P., REZNICHENKO, O. M., BORTSOV, V. M., KVASOV, G. V., OSTAPCHENKO, L. M., SHEVCHUK, M. V., SHEVCHENKO, V. A., YATSKIV, YA. S., VAVILOVA, I. B., BRAUDE, I. S., SHKURATOV, Y. G., RYABOV, V. B., PIDGORNYY, G. I., TYMOSHEVSKY, A. G., LYTVYENENKO, O. O., GALANIN, V. V., RYABOV, M. I., BRAZHENKO, A. I., VASHCHISHIN, R. V., FRANTSUZENKO, A. V., KOSHOVYY, V. V., IVANTYSHYN, O. L., LOZINSKY, A. B., KHARCHENKO, B. S., VASYLIEVA, I. Y., KRAVTSOV, I. P., VASYLKIVSKY, Y. V., LITVINENKO, G. V., MUKHA, D. V., VASYLENKO, N. M., SHEVTSOVA, A. I., MIROSHNICHENKO, A. P., KUHAJ, N. V., SOBOLEV, YA. M. and TSVYK, N. O., 2021. The founder of the decameter radio astronomy in Ukraine academician of NAS of Ukraine Semen Yakovych Braude is 110 years old: history of creation and development of the national experimental base for the last half century. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 26, no. 1, pp. 5–73. (in Ukrainian). DOI: 10.15407/rpra26.01.005
2. MELNIK, V. N., KONOVALENKO, A. A., DOROVSKYY, V. V., LECACHEUX, A., RUCKER, H. O. and SHEVCHUK, M. V., 2021. Exploration of the solar decameter radio emission with the UTR-2 radio telescope. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 26, no. 1, pp. 74–89. DOI: 10.15407/rpra26.01.074
  3. ZAKHARENKO, V. V., RYABOV, V. B., KRAVTSOV, I. P., MYLOSTNA, K. YU., KHARLANOVA, V. YU., VASYLIEVA, I. Y., ULYANOV, O. M., KONOVALENKO, O. O., KALINICHENKO, M. M., ZARKA, P., RUCKER, H. O., FISCHER, G., YERIN, S. M., GRIEBMEIER, J.-M., SYDORCHUK, M. A., SHEVTSOVA, A. I., SKORYK, A. O. and SHEVCHENKO, V. A., 2021. Sporadic radio emission of space objects at low-frequencies. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 26, no. 2, pp. 99–129. (in Ukrainian). DOI: 10.15407/rpra26.02.099
  4. ULYANOV, O. M., 2021. History of low-frequency research of pulsars. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 26, no. 2, pp. 130–147. (in Ukrainian). DOI: 10.15407/rpra26.02.130
  5. KALINICHENKO, M. M., KUHAJ, N. V., KONOVALENKO, O. O., BRAZHENKO, A. I., BUBNOV, I. M., YERIN, S. M., RUCKER, H. O., ZARKA, P., LECACHEUX, A., IVANTYSHYN, O. L., LYTVYENENKO, O. O., ROMANCHUK, O. I. and FRANTSUZENKO, A. V., 2021. Investigations of cosmic sources radio emission scintillations due to interplanetary plasma irregularities at the Institute of Radio Astronomy, NAS Ukraine. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 26, no. 2, pp. 148–164. (in Ukrainian). DOI: 10.15407/rpra26.02.148
  6. MIROSHNICHENKO, A. P., 2021. Environment density of a giant radio structure for galaxies and quasars with steep radio spectra. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 26, no. 2, pp. 165–172. (in Ukrainian). DOI: 10.15407/rpra26.02.165
  7. KRYMKIN, V. V., 1971. The spectrum of low-frequency radio emission. *Radiophys. Quantum Electron.* vol. 14, is. 2, pp. 161–164. DOI: 0.1007/BF01031395
  8. ANTONOV, A. V., 1973. Investigation of the cosmic-background radio emission at a frequency of 10 MHz. *Radiophys. Quantum Electron.* vol. 16, is. 5, pp. 581–584. DOI: 10.1007/BF01033495
  9. HAMILTON, P. A. and HAYNES, R. F., 1968. Observations of the Southern Sky at 10.02 MHz. *Aust. J. Phys.* vol. 21, is. 6, pp. 895–902. DOI: 10.1071/PH680895
  10. ZHUK, I. N., 1973. Distribution of the radio brightness of the galactic background in the decameter range of radio waves. *Radiophys. Quantum Electron.* vol. 16, is. 5, pp. 577–580. DOI: 10.1007/BF01033494
  11. TURTLE, A. J., PUGH, J. F., KENDERDINE, S. and PAULINY-TOTH, I. I. K., 1962. The Spectrum of the Galactic Radio Emission: I. Observations of Low Resolving Power. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* vol. 124, is. 4, pp. 297–312. DOI: 10.1093/mnras/124.4.297
  12. BRIDLE, A. H. and BALDWIN, J. E., 1967. The Spectrum of the Radio Background Between 13 and 404 MHz. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* vol. 136, is. 2, pp. 219–240. DOI: 10.1093/mnras/136.2.219
  13. ELLIS, G. R. A., 1982. Galactic Radio Emission Below 16–5 MHz and the Galactic Emission Measure. *Aust. J. Phys.* vol. 35, is. 1, pp. 91–104. DOI: 10.1071/PH820091
  14. MATHEWSON, D. S., BROTEN, N. W. and COLE, D. J., 1965. A survey of the Southern Sky at 30 Mc/s. *Aust. J. Phys.* vol. 18, is. 6, pp. 665–668. DOI: 10.1071/PH650665
  15. CASWELL, J. L., 1976. A Map of the Northern Sky at 10 MHz. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* vol. 177, is. 3, pp. 601–616. DOI: 10.1093/mnras/177.3.601
  16. ROGER, R. S., COSTAIN, C. H., LANDECKER, T. L. and SWERDLYK, C. M., 1999. The radio emission from the Galaxy at 22 MHz. *Astron. Astrophys. Supp. Ser.* vol. 137, is. 1, pp. 7–19. DOI: 10.1051/aas:1999239
  17. VASILENKO, N. M., MUKHA, D. V., SIDORCHUK, M. A. and SIDORCHUK, K. M., 2005. Making and Processing of the Northern Sky Maps Based on the Continuum Survey with the UTR-2 Radio Telescope. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 10, no. 3, pp. 244–253. (in Russian).
  18. KRYMKIN, V. V., 1978. Observations of the Rosette nebula NGC 2237 at decametric wavelengths. *Astrophys. Space Sci.* vol. 54, is. 1, pp. 187–197. DOI: 10.1007/BF00637907
  19. ABRAMENKOV, E. A. and KRYMKIN, V. V., 1990. Parameters of the magnetic field in the local Galactic arm derived from low frequency absorption measurements in the ionized gas. In: R. BECK, P. P. KRONBERG, R. WIELEBINSKI, eds. *Galactic and Intergalactic Magnetic Fields. Proceedings of the 140th Symposium of IAU.* Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publ., pp. 49–53.
  20. KRYMKIN, V. V. and SIDORCHUK, M. A., 1988. Observation of the galactic anticentre region in the direction of PKS 0607+17 with the UTR-2 and RATAN-600 radio telescopes. *Astron. Astrophys.* vol. 200, pp. 185–190.
  21. SIDORCHUK, M. A. and ABRAMENKOV, E. A., 2006. Supernova Remnants HB3, 3C58 and IC443 at Decametric Waves. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 11, no. 2, pp. 134–154. (in Russian).

22. KRYMKIN, V. V. and SIDORCHUK, M. A., 1990. Decameter-wave observations of supernova remnant CTA 1. *Sov. Astron.* vol. 34, no. 2, pp. 197–200.
23. KRYMKIN, V. V., ABRAMENKOV, E. A. and SIDORCHUK, M. A., 1982. Supernova remnant “Monoceros Loop” at decameter waves. *Dopovidi AN URSR*. No. 3, pp. 44–47. (in Ukrainian).
24. KRYMKIN, V. V., SIDORCHUK, M. A. and ABRAMENKOV, E. A., 1988. Decameter-wave investigation of the supernova remnant HB9. *Sov. Astron.* vol. 32, pp. 634–638.
25. KABANOVA, T. I., KRYMKIN, V. V. and SIDORCHUK, M. A., 1989. Low-frequency observations of the supernova remnant HB21. *Kinematika i fizika nebesnyh tel*. vol. 5, no. 3, pp. 44–49. (in Russian).
26. KONOVALENKO, A. A., YERIN, S. N., BUBNOV, I. N., TOKARSKY, P. L., ZAKHARENKO, V. V., ULYANOV, O. M., SIDORCHUK, M. A., STEPKIN, S. V., GRIDIN, A. O., KVASOV, G. V., KOLYADIN, V. L., MELNIK, V. M., DOROVSKYY, V. V., KALINICHENKO, M. M., LITVINENKO, G. V., ZARKA, P., DENIS, L., GIRARD, J., RUKER, H. O., PANCHENKO, M., STANISLAVSKY, A. A., KHRISTENKO, O. D., MUKHA, D. V., REZNICHENKO, O. M., LISACHENKO, V. M., BORTSOV, V. V., BRAZHENKO, A. I., VASYLIEVA, I. Y., SKORYK, A. O., SHEVTSOVA, A. I. and MYLOSNA, K. Y., 2016. Astrophysical Studies with Small Low-Frequency Radio Telescopes of New Generation. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 21, no. 2, pp. 83–131. (in Russian). DOI: 10.15407/rpra21.02.083
27. VASILENKO, N. M. and SIDORCHUK, M. A., 2017. Separation of galactic and extragalactic radio emission at decameter wavelengths. *Astrophys. Space Sci.* vol. 362, id. 221. DOI 10.1007/s10509-017-3202-0
28. SIDORCHUK, K. M., KONOVALENKO, A. A., RUCKER, H. O., LECACHEUX, A., DENIS, L., SIDORCHUK, M. A., RASHKOVSKY, S. L., DOROVSKY, V. V. and ZAKHARENKO, V. V., 2005. New Methods and Equipment of Decametric Radio Astronomy for Continuum Observation at the UTR-2 Radio Telescope. *Kinemat. Phys. Celest. Bodies*. vol. 21, no. 5, pp. 57–60.
29. BRAUDE, S. YA., RASHKOVSKY, S. L., SIDORCHUK, K. M., SIDORCHUK, M. A., SOKOLOV, K. P., SHARYKIN, N. K. and ZAKHARENKO, S. M., 2002. Decametric Survey of Discrete Sources in the Northern Sky. *Astrophys. Space Sci.* vol. 280, is. 3, pp. 235–299. DOI: 10.1023/A:1015534108849
30. BRAUDE, S. YA., MIROSHNICHENKO A. P., RASHKOVSKII, S. L., SIDORCHUK, K. M., SIDORCHUK, M. A. and SHARYKIN, N. K., 2003. Decametric Survey of Discrete Sources in the Northern Sky. XIIIb. Spectra of Discrete Sources in the Declination Zone 30° to 40°. *Kinemat. Phys. Celest. Bodies*. vol. 19, no. 4, pp. 291–306. (in Russian).
31. SOKOLOV, K. P., 1988. Determination of the parameters of the spatial distribution of extragalactic radio sources observed in the decameter range –  $P(D)$  analysis at 25 MHz. *Sov. Astron.* vol. 32, no. 2, pp. 121–126.
32. SOKOLOV, K. P., 1990. Analysis of the Astrophysical Significance of Radio Source Counts Obtained in Different Frequency Ranges. *Aust. J. Phys.* vol. 43, no. 2, pp. 263–269. DOI 10.1071/PH900263
33. ZAKHARENKO, V., KONOVALENKO, A., ZARKA, P., ULYANOV, O., SIDORCHUK, M., STEPKIN, S., KOLYADIN, V., KALINICHENKO, N., STANISLAVSKY, A., DOROVSKYY, V., SHEPELEV, V., BUBNOV, I., YERIN, S., MELNIK, V., KOVAL, A., SHEVCHUK, N., VASYLIEVA, I., 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, is. 4, id. 1641010. DOI: 10.1142/S2251171716410105

M. A. Sidorchuk, N. M. Vasilenko, O. M. Ulyanov,  
O. O. Konovalenko, D. V. Mukha, E. A. Abramnikov,  
K. M. Sidorchuk, and A. I. Miasoied

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

#### 50 YEARS OF RESEARCH IN CONTINUUM AT THE UTR-2 RADIO TELESCOPE

*Purpose:* The results of research in continuum decameter-wave radio emission of the Galaxy background, ionized hydrogen regions, supernova remnants, extragalactic discrete sources, extended galaxies, galactic clusters, extragalactic background are given. The aim of this work is reviewing the results achieved for over 50-years of the UTR-2 radio telescope research of our Galaxy and its population, as well as extragalactic radio sources in the continuum radio emission spectrum at extremely low frequencies for the ground based observations.

*Design/methodology/approach:* The review, analysis, collection of archival data in various publications related to the subject of this work.

*Findings:* The basic results of studying the ionized hydrogen regions, supernova remnants, Galaxy background emission and its large-scale structure are given, and the maps of these sources are obtained. The catalog of extragalactic discrete radio sources of the most Northern sky part and the cosmological conclusions based on its analysis are described; the estimate of the isotropic extragalactic background brightness temperature is obtained; for the first time, the observational results for the Andromeda galaxy and two galactic clusters Coma and A2255 are given briefly.

*Conclusions:* All the results presented here emphasize the uniqueness and importance of research in the decameter wavelength range, and the large area, flexibility of structure, continuous improvement make the UTR-2 radio telescope an indispensable tool for solving the most important tasks of modern radio astronomy, despite its respectable age. For example, only in the range of 10 to 30 MHz the ionized part



of the most common element in the universe, the hydrogen, becomes optically thick and begins to absorb the synchrotron emission on the line of sight, which allows rather easy separation of thermal and non-thermal components of radio emission. This property allows to determine the ionized hydrogen regions' electron temperature and the electron concentration on the line of sight independently in studying the hydrogen emission regions. When studying the supernova remnants, we can determine the ionized matter location by their spectrum drops – before, inside or behind the remnant. Based on the HB3 supernova remnant radio images, an assumption was made on the existence of an ionized hydrogen relic shell around it, being caused by the initial ultraviolet flash of a supernova.

For the first time, the maps of the Northern sky large-scale structure in the declination range from  $-15^\circ$  to  $+85^\circ$  at extremely low frequencies 10, 12.6, 14.7, 16.7, 20 and 25 MHz for the ground-based observations are published, which, besides their own scientific value, may allow to correct the

UTR-2 radio telescope imaging results. Using the full-resolution UTR-2 maps and the developed method of multi-frequency T–T diagrams, it was possible to separate the background radiation into galactic and extragalactic components and construct the spectrum of the latter.

From the analysis of the most complete decameter wavelength range catalog of discrete sources, it follows that there is a gap in the redshift spatial distribution for all classes of extragalactic sources.

The existence of an ionized hydrogen ring in the Andromeda Nebula disk has been suggested. It is shown that the main part of the galaxy clusters decameter-wave emission comes from haloes and relics.

*Key words:* decameter range, discrete sources, supernova remnants, catalog, continuum radio emission, HII regions, UTR-2, background emission

*Стаття надійшла до редакції 07.09.2021*