

КОНОВАЛЕНКО
Олександр Олександрович –
академік НАН України,
керівник відділення
низькочастотної радіоастрономії –
заступник директора
Радіоастрономічного інституту
НАН України

ПРО ПІДСУМКИ ВИКОНАННЯ ЦІЛЬОВОЇ КОМПЛЕКСНОЇ ПРОГРАМИ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ НАН УКРАЇНИ «МОДЕРНІЗАЦІЯ РАДІОТЕЛЕСКОПА УТР-2 І ПЕРСПЕКТИВНИЙ РОЗВИТОК ДЕКАМЕТРОВОЇ РАДІОАСТРОНОМІЇ В УКРАЇНІ»

За матеріалами наукового повідомлення
на засіданні Президії НАН України
29 січня 2014 року

Показано сучасний стан і перспективи низькочастотної радіоастрономії в Україні. Радіотелескопи декаметрових хвиль УТР-2 і УРАН на діапазон 8–32 МГц залишаються найбільшими у світі та найкращими за своєю інформативністю в дослідженнях космічного радіовипромінювання. Завдяки комплексній модернізації радіотелескопів, створенню інструменту ГУРТ нового покоління на діапазон 8–80 МГц з використанням сучасних інформаційних і телекомунікаційних технологій вдалося зробити низку важливих астрофізичних відкриттів. Українські низькочастотні радіоастрономічні засоби з їх подальшою модернізацією є перспективними для вітчизняних та міжнародних наукових проектів, зберігають і розвивають пріоритет України в цій актуальній галузі фундаментальної науки.

Ключові слова: низькочастотна радіоастрономія, радіотелескоп, цифрова реєстрація сигналів, астрофізичний об'єкт.

Вступ

Радіоастрономія належить до тих галузей фундаментальної науки, які розвиваються найбільш бурхливо. Цей напрям збагатив наші знання про Всесвіт результатами і фактами першорядного значення. Є вагомі підстави вважати, що подальший прогрес радіоастрономії дасть нові відкриття, важливі як для астрофізики, так і для фізичної науки в цілому.

Україна посідає гідне місце серед провідних радіоастрономічних держав, що зумовлено створенням і застосуванням

найбільших і найефективніших у світі радіотелескопів декаметрових хвиль УТР-2 і УРАН. Понад 40 років вони є основними інструментами у вивченні космічного радіовипромінювання на гранично низьких частотах — менш як 30 МГц і дали змогу отримати велику кількість пріоритетних астрофізичних результатів, визнаних світовою радіоастрономічною спільнотою. Уже більш як 10 років низькочастотні радіотелескопи входять до державного реєстру об'єктів науки, що становлять національне надбання України.

Зазначені радіотелескопи працюють у безперервному режимі, їх задіяно в багатьох національних і міжнародних наукових програмах та проектах. Постійно забезпечується модернізація їх антенно-апаратних засобів. Тому, незважаючи на бурхливий розвиток низькочастотної радіоастрономії за кордоном, вітчизняні інструменти залишаються найкращими. Україна й досі зберігає провідну роль у цій актуальній галузі фундаментальної науки і останнім часом значною мірою цьому сприяє виконання комплексної програми наукових досліджень НАН України «Модернізація радіотелескопа УТР-2 і перспективний розвиток декаметрової радіоастрономії в Україні».

В огляді наведено основні технічні й наукові результати виконання цієї цільової програми, проаналізовано сучасний стан експериментальної бази, розглянуто перспективи розвитку зазначеного наукового напрямку в Україні та його інтеграції у світову радіоастрономію.

Історія низькочастотної радіоастрономії в Україні

Радіоастрономія як наука виникла саме на декаметрових хвилях завдяки роботам Карла Янського, який на початку 30-х років минулого століття відкрив космічне радіовипромінювання поблизу частоти 15 МГц. Однак подальший прогрес радіоастрономії був пов'язаний насамперед з освоєнням дедалі більш короткохвильових ділянок радіоспектра, аж до сантиметрових і міліметрових хвиль. Причина цього проста і очевидна — коли розмір апертури, або

бази інтерферометра, фіксований, для одержання максимального кутового розділення (це одне з основних завдань спостережної астрономії) потрібно використовувати якомога більш короткі хвилі. До кінця 50-х років інструменти досліджень на декаметрових хвилях мали обмежені можливості, низьку кутову роздільну здатність, малі розміри, вузький робочий діапазон і були некерованими за обома координатами. Незважаючи на деякі важливі відкриття, наприклад виявлене Берком і Франкліном 50 років тому спорадичне радіовипромінювання Юпітера, на той час декаметровий діапазон не було освоєно належною мірою. До того ж у декаметровому діапазоні є безліч факторів, що заважають і значно ускладнюють радіоастрономічні спостереження. До них належать численні радіозавади природного та штучного походження; середовище поширення радіохвиль, яке спотворює сигнали; висока температура галактичного фону, що обмежує чутливість.

Наприкінці 50-х років видатний український учений академік НАН України С.Я. Брауде (1911—2003) першим усвідомив значущість і перспективність астрофізичних спостережень на гранично низьких частотах (10—25 МГц), які можна здійснювати з поверхні Землі. Незважаючи на наявні апаратно-методичні труднощі, С.Я. Брауде ризикнув, розпочавши освоєння низькочастотної ділянки спектра космічного радіовипромінювання і створення відповідної експериментальної бази. Від самого початку неocenенну підтримку цієї діяльності завжди забезпечував президент НАН України академік Б.Є. Патон. Великий колектив науковців, інженерів і техніків (тоді в Інституті радіофізики і електроніки (ІРЕ) АН УРСР) створив кілька поколінь (спочатку порівняно простих) радіотелескопів, а на початку 70-х років під Харковом було побудовано радіотелескоп УТР-2 (Український Т-подібний радіотелескоп, друга модель) [1], який і донині є найбільшим і найсучаснішим у світі інструментом. У 1985 р. на базі радіоастрономічних відділів ІРЕ було створено Радіоастрономічний інститут АН УРСР на чолі з академіком Л.М. Литвиненком.

Найбільші у світі радіотелескопи декаметрових хвиль УТР-2 і УРАН

Характерними особливостями радіотелескопа УТР-2 (рис. 1) є: великі лінійні розміри (2×1 км), ефективна площа (150 000 м²), висока спрямованість (ширина діаграми спрямованості близько 0,5°), низький рівень бічних пелюсток, широкий діапазон частот (8–32 МГц), багатопроменевість, електронне керування променем у широкому секторі за обома координатами, великий динамічний діапазон, завадостійкість, гнучко змінювана конфігурація, розвинена система контролю, стійкість до зовнішніх кліматичних впливів, надійність, екологічна безпека. Отже, параметри і принципи побудови радіотелескопа УТР-2 дозволяють реалізувати більшість основних методів боротьби з факторами, що стають на заваді спостереженням у декаметровому діапазоні.

На основі радіотелескопа УТР-2 в 70–80-х роках було створено унікальну систему декаметрових інтерферометрів УРАН (Український радіоінтерферометр Академії наук) [2]. Крім УТР-2 до неї входять ще 4 радіотелескопи менших розмірів (рис. 2). УРАН-1 і УРАН-4 належать РІ НАН України, УРАН-2 – Полтавській гравіметричній обсерваторії Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України; УРАН-3 – Фізико-механічному інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України (Львів). Система утворює бази від 40 до 950 км, що забез-

печує рекордну кутову роздільну здатність близько 1 кутової секунди (це відповідає фундаментальній межі, яка зумовлена розсіюванням у міжзоряному середовищі). Нині за допомогою системи УРАН вимірюють модуль функції видимості об'єктів та його залежність від бази, частоти і часового кута. Це дає змогу визначати структуру радіоджерел на декаметрових хвилях шляхом комп'ютерного моделювання та використання радіозображень на більш високих частотах. Основні параметри декаметрових радіотелескопів України наведено в таблиці.

За більш ніж 30-річний період функціонування радіотелескопів УТР-2 і УРАН отримано значний обсяг нової астрофізичної інформації. Результати опубліковано в сотнях наукових статей, а також у кількох оглядах [3–5]. Більшість об'єктів Всесвіту від найближчого оточення Землі, Сонячної системи, нашої Галактики до найвіддаленіших радіогалактик і квазарів виявилися доступними для досліджень. Доведено високу інформативність декаметрової радіоастрономії. Стали можливими прецизійні вимірювання різноманітних енергетичних, просторових, спектральних, часових, поляризаційних характеристик космічного радіовипромінювання, що несуть інформацію і про процеси в масштабах Всесвіту, і про тонкі атомні ефекти.

Результати, отримані в галузі декаметрової радіоастрономії за допомогою насамперед

Основні параметри декаметрових радіотелескопів України

Радіотелескопи	Розташування	Діапазон частот, МГц	Максимальна ефективна площа, м ²	Кількість елементів, поляризація	Відстань до УТР-2 (LOFAR), км	Синтезоване РСДБ розділення на 25 МГц
УТР-2	Харків, РІ НАНУ	8–32	150 000	2040 1 лінійна	0 (~2000)	25' × 25'
УРАН-1	Зміїв, РІ НАНУ	8–32	5 500	96 2 лінійні	42 (~1900)	15"
УРАН-2	Полтава, ПГО НАНУ	8–32	28 000	512 2 лінійні	120 (~1800)	5"
УРАН-3	Львів, ФМІ НАНУ	8–32	14 000	256 2 лінійні	915 (~1000)	1"
УРАН-4	Одеса, РІ НАНУ	8–32	7 300	128 2 лінійні	613 (~1500)	1,3"

українських телескопів, стимулюють її прогрес у всьому світі, в тому числі створення нових гігантських наземних низькочастотних радіотелескопів та інструментів космічного базування.

Модернізація радіоастрономічної експериментальної бази і створення інструменту нового покоління ГУРТ

Отже, до середини 2000-х років Україна впевнено тримала лідерську позицію у світовій низькочастотній радіоастрономії. Наша країна була монополістом у цій галузі — подібних систем на земній кулі не було взагалі. Для про-



Рис. 1. Найбільший у світі радіотелескоп декаметрових хвиль УТР-2; $f = 8\text{--}32$ МГц, $A = 150\,000$ м², $N = 2040$

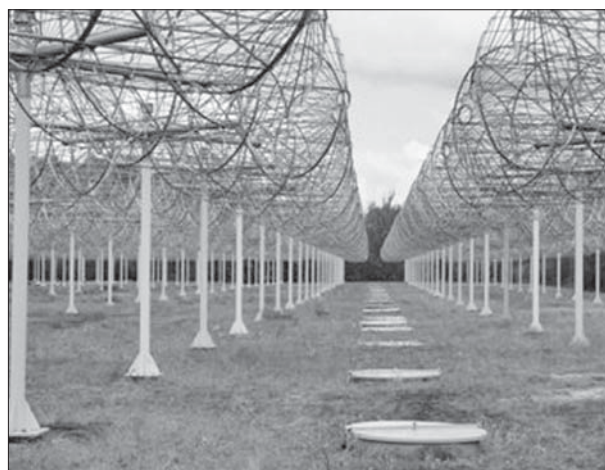


Рис. 2. Радіотелескоп системи УРАН; $f = 8\text{--}32$ МГц, $N = 992 \times 2 = 1984$



Рис. 3. Апаратний зал УТР-2 – ГУРТ із системою реєстрації нового покоління. Кількість каналів – 81920; смуга частот – 32 МГц; роздільні здатності – 0,25 і 4 кГц; динамічний діапазон – 90 дБ



Рис. 4. Створення радіотелескопа ГУРТ; $f = 8\text{--}80$ МГц, $N = 550$. 2013 р.

ведення спільних досліджень в Україну приїздили визнані закордонні фахівці.

Упродовж усього періоду функціонування радіотелескопів постійно здійснювалася певна модернізація різних систем [6] – антенного підсилення, контролю, реєстрації, комп'ютерного керування й оброблення. Проте через проблеми з фінансуванням така модернізація часто

відставала від морального та фізичного старіння елементів і систем радіотелескопів. Більш того, близько 10 років тому у вітчизняній низькочастотній радіоастрономії з'явилися реальні конкуренти. Світова радіоастрономічна спільнота зрозуміла і визнала, що НЧ-діапазон (декаметровий – метровий) є надзвичайно інформативним, актуальним і надає унікальну астрофізичну інформацію, недоступну в інших діапазонах астрофізичних досліджень. Значною мірою це розуміння ґрунтувалося на досвіді роботи українських радіоастрономів, а відповідні ідеї перспективного розвитку низькочастотної радіоастрономії сформувався також в Україні [7].

Зараз у багатьох розвинених країнах світу (Нідерланди, США, Франція, Німеччина, Велика Британія, Швеція) почалося будівництво низькочастотних радіотелескопів нового покоління: LOFAR (Low Frequency Array); E-LOFAR (European LOFAR); LWA (Long Wavelength Array) [8, 9]. Було проанонсовано, що такі системи матимуть діапазон 10–80 МГц (ширший, ніж в УТР-2 і УРАН), площу до 1 млн м² (більшу, ніж в УТР-2 і УРАН). На ці проекти вже витрачено близько 1 млрд євро.

Поява конкурентів – зовсім непогана річ з огляду на загальний розвиток науки. Однак не можна змиритися з відставанням після багаторічного лідерства в цій науковій галузі. У зв'язку з цим кілька років тому було розпочато цільову програму НАН України, спрямовану на комплексну модернізацію радіотелескопів і перспективний розвиток низькочастотної радіоастрономії в Україні. Запропонована концепція цієї програми має три складові: а) глибока модернізація засобів і методів досліджень на українських радіотелескопах; б) створення додаткового до УТР-2 радіотелескопа нового покоління на обсерваторії ім. С.Я. Брауде зі смугою аналізу, не меншою, принаймні, ніж у LOFAR і LWA; в) нові пошукові астрофізичні дослідження з використанням нових засобів і методів спостережень як в Україні, так і в міжнародних експериментах.

Найбільш складна і важлива частина модернізації пов'язана з розробленням і створенням

сучасної системи реєстрації радіоастрономічних сигналів. Виготовлено і впроваджено на телескопах УТР-2, УРАН-2, УРАН-3 сім комплектів нових приладів відповідно до кількості віддалених телескопів (2) і променів УТР-2 (5) [10, 11]. У приладах використано сучасні інформаційні, телекомунікаційні, цифрові, грид-технології. За своїми параметрами нові системи реєстрації не мають аналогів у НЧ-радіоастрономії і забезпечують широку смугу аналізу, високі часову й частотну роздільні здатності, максимальні чутливість, динамічний діапазон та завадостійкість. Результати функціонування реєстраторів відображаються переважно у вигляді 3-вимірних динамічних спектрів: горизонтальна вісь — це час, вертикальна — частота, а третій вимір — інтенсивність, яка на 2-вимірному зображенні відповідає кольору або яскравості.

На рис. 3 можна бачити новий, спеціально створений апаратний зал УТР-2. Нова якість зумовлена не тільки і не стільки суттєвим зменшенням розмірів комплексу та зниженням енергоспоживання, а насамперед вражаючим поліпшенням його параметрів — у тисячі разів.

Поєднання унікальних параметрів радіотелескопів УТР-2 і УРАН з параметрами нової апаратури дає таку ефективність спостережень, яка істотно перевершує можливості закордонних високовартісних інструментів, що зараз активно будуються.

Однак на цих досягненнях зупинитися не можна. Створено і впроваджено додаткову до УТР-2 високоефективну антенну систему нового покоління зі смугою аналізу, не меншою ніж 10–80 МГц [12, 13], і вдалося це зробити на найвищому рівні. «Серце» антенної ґратки — активний елемент, розроблений в Україні, має більшу чутливість, смугу частот, завадостійкість, надійність, менші вартість і енергоспоживання, ніж елементи, створені в Нідерландах, США, Франції, що було доведено результатами спільних міжнародних порівняльних досліджень у різних країнах світу.

На сьогодні на обсерваторії ім. С.Я. Брауде біля УТР-2 вже встановлено 550 елементів (275 схрещених диполів) (рис. 4). Цей новий

інструмент має назву ГУРТ (Гігантський український радіотелескоп). Він значно розширює можливості досліджень як в Україні, так і за кордоном під час скоординованих експериментів. На цьому телескопі вже проведено тестові спостереження, які підтвердили високу якість системи.

Основні апаратно-методичні та астрофізичні результати і перспективи розвитку низькочастотної радіоастрономії

Нижче наведено окремі основні результати робіт, виконаних переважно впродовж 2010–2013 рр. відповідно до цільової програми НАН України.

Модернізація українських низькочастотних радіоастрономічних систем і методів спостережень

- На радіотелескопі УТР-2 у новому лабораторному приміщенні впроваджено 5 комплектів (відповідно до 5-променевого режиму роботи) цифрових приймачів нового покоління. Забезпечено їх синхронну роботу та універсальність використання. Інформативність нових засобів зросла на 3 порядки порівняно з попередніми. Істотно збільшилися чутливість, смуга аналізу, динамічний діапазон, частотна і часова роздільні здатності, що підтверджено лабораторними і натурними експериментами. Такі прилади впроваджено на телескопах УРАН-2 (ПГО ІГФ НАНУ) і УРАН-3 (ФМІ НАНУ) [10, 11].

- На радіотелескопі УТР-2 введено в експлуатацію радіогеліограф з кадром $5 \times 8 = 40$ променів, який забезпечує можливості картографування, визначення положень джерел у сонячній короні. Дані геліографа разом із результатами вимірювання динамічних спектрів випромінювання Сонця і спостережень міжпланетних мерехтінь надають унікальну інформацію для вирішення проблем космічної погоди [14].

- На радіотелескопі УТР-2 впроваджено нові ефективні системи антенного підсилення,

контролю, автоматичного керування променем телескопа і зміни режимів його роботи (контроль — калібрування — спостереження).

- Ретельне вивчення і розв'язання проблем електромагнітної сумісності на обсерваторії УТР-2 — ГУРТ ім. С.Я. Брауде дозволило істотно знизити завадний вплив і забезпечити рекордну флукуаційну чутливість менш як 1 Ян.

- Завдяки впровадженню грид-кластера на обсерваторії в рамках Програми інформатизації НАН України забезпечено нові автоматизовані робочі місця, можливості реєстрації, архівації, передавання й оброблення даних, у тому числі дистанційний доступ каналами Інтернету.

- Розроблено і впроваджено прецизійні методи калібрування, еталонування і розрахунку параметрів великих низькочастотних антен-граток, у тому числі УТР-2, УРАН, ГУРТ.

- Запропоновано, впроваджено й апробовано нові методи радіоастрономічних спостережень (багатопроневе і багатоантенне приймання, метод багатократного порівняння, геліографічний режим, картографування в автокореляційному режимі, максимізація інтегрування за частотою і часом), які у поєднанні з можливостями апаратури забезпечують високі чутливість, завадостійкість, надійність і ефективність експериментів [11].

Створення і впровадження додаткових елементів і систем гігантського українського радіотелескопа ГУРТ

- Встановлено додаткові субгратки ГУРТ (діапазон 8–80 МГц, 25 крос-диполів, 50 диполів у кожній), у тому числі виконано земляні роботи, підготовку і прокладання магістральних кабелів, установлення апаратних шаф і комунікаційних систем, монтаж опор під диполі та встановлення обладнання. Загальну кількість диполів доведено до 275 (550 елементарних диполів), що перевищує кількість диполів у радіотелескопах УРАН-1, УРАН-3, УРАН-4.

- Розроблено аналого-цифрове перетворення сигналів на субгратках для передавання оптоволоконним каналом зв'язку. Реалізовано

переваги оптичного каналу — відсутність частотної залежності коефіцієнта передачі і втрат, висока стійкість до електромагнітних завад, наявність резервних каналів для керування, калібрування і перевірки секційного устаткування.

- Проведено повне оснащення віддалених субграток ГУРТ — активні елементи, системи підсилення, фільтрації, електроживлення, контролю, комп'ютерного керування.

- Розроблено принципово нову надширокосмугову систему цифрової реєстрації реального часу: смуга аналізу — до 80 МГц, тактова частота — 160 МГц, розрядність АЦП — 16 біт, кількість входів — 2, кількість каналів — 16 256, роздільна здатність — 1 мс і 4 кГц, динамічний діапазон — 90 дБ.

- Експериментально і теоретично доведено, що створені ґратки ГУРТ з широкосмуговою реєстрацією за своїми параметрами перевершують відомі світові системи. Об'єднання УТР-2 з ГУРТ і УРАН істотно розширює можливості українських радіоастрономічних систем [13].

- Розроблено детальну ескізу документацію на всі радіоелектронні й механічні вузли та елементи системи ГУРТ. Вона є необхідною і достатньою для масового виготовлення елементів на підприємствах радіоелектронної галузі, яких вистачає в Україні.

Пошукові дослідження об'єктів Всесвіту з використанням нових засобів і методів спостережень

- Розпочаті в рамках цієї програми пошукові оглядові дослідження імпульсних і транзієнтних явищ у Всесвіті дали змогу виявити імпульсне періодичне випромінювання 40 нових для декаметрових хвиль пульсарів [15, 16].

- За допомогою цифрових спектральних приймачів у крос-кореляційному режимі (перемножування антен північ-південь і захід-схід УТР-2) задетектовано велику серію рекомбінаційних ліній (понад 100 в діапазоні 16–32 МГц). Це не лише значно підвищило чутливість і просторовий дозвіл, а й істотно поліпшило завадостійкість завдяки звуженню тілесного кута діаграми спрямованості телескопа [17, 18] (рис. 5).

- В умовах мінімуму сонячної активності (період, який завершується) в максимально широкому діапазоні частот (10–32 МГц) визначено температуру яскравості, щільність потоку і спектр випромінювання сонячної корони [19].

- За допомогою вдосконаленої методики вивчення грозових розрядів у атмосфері Сатурна (waveform-режим) уперше зареєстровано дисперсійну затримку в середовищі поширення (порядку мікросекунди), що є додатковим критерієм ідентифікації ефекту на тлі земних блискавок. Синхронні спостереження планети Сатурн на радіотелескопі УТР-2 і космічному апараті «Кассіні» виявили безліч невідомих раніше тонких частотно-часових особливостей у радіовипромінюванні грозових розрядів [20, 21] (рис. 6, див. вклейку).

- Виявлено нові квазісплески радіовипромінювання активних зірок ADleo і EVlac. Уперше проведено статистичний порівняльний аналіз параметрів сплесків (швидкість дрейфу, ширина за часом і частотою, інтенсивність) і мерехтінь джерел континууму для надійної ідентифікації ефекту [11].

- Під час тривалих спостережень на УТР-2 виявлено нове фізичне явище, властиве діапазону декаметрових хвиль, — ефект динамічної плутанини. Воно пов'язане з процесами поширення довгих хвиль (мерехтіннями) в середовищі і є основним обмежувальним фактором у виявленні слабого спорадичного радіовипромінювання та його надійної ідентифікації [11].

- Запропоновано і прийнято міжнародним співтовариством ідею багатоантенних низькочастотних вітчизняних і міжнародних досліджень. Її сутність полягає в скоординованих (синхронних) спостереженнях на найбільших у світі українських радіотелескопах (УТР-2, ГУРТ, УРАН-1 — УРАН-4) і закордонних інструментах (NDA, LSS, LOFAR, E-LOFAR, LWA та ін.), що розташовані на відстанях понад 1000 км, а також на космічних місіях (Cassini, STEREO, Juno та ін.). Це дозволить значно підвищити чутливість, роздільну здатність, надійність, ефективність вимірювань і, що найголовніше, істотно зменшити негативний вплив

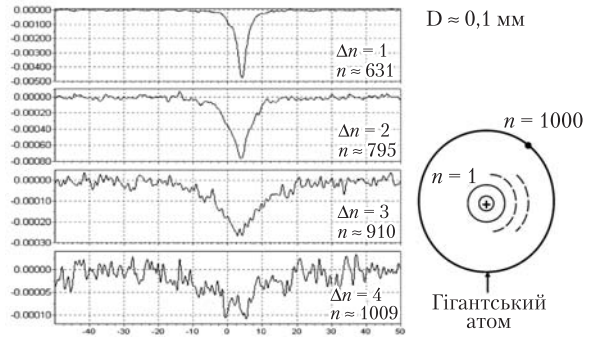


Рис. 5. Детектування спектральних ліній гігантських рідбергівських міжзоряних атомів на УТР-2

завад та іоносфери, властивий саме низькочастотним дослідженням [11, 22–25].

- Проведено велику кількість пошукових низькочастотних досліджень Всесвіту, більшість з яких уже дали позитивні результати і виконуються на постійній основі. Вони стосуються континуального, монохроматичного, імпульсного, спорадичного радіовипромінювання Сонячної системи (Сонце, Юпітер, Сатурн, міжпланетне середовище, іоносфера; рис. 7, див. вклейку), Галактики (міжзоряне середовище, галактичний фон, залишки наднових, емісійні туманності, пульсари, активні зірки, екзопланети, транзйентні явища) і Метагалактики (радіогалактики, квазари, транзйенти). Усі отримані результати є пріоритетними і становлять підґрунтя для подальших детальних вітчизняних і міжнародних досліджень [26–28].

Міжнародне наукове співтовариство активно використовує високий потенціал і досягнення української низькочастотної радіоастрономії. Радіотелескопи УТР-2, УРАН і ГУРТ офіційно входять до європейських проектів LOFAR, E-LOFAR та ін. для досліджень Сонця, Юпітера, Сатурна, екзопланет. Найбільш плідно розвивається співпраця з Францією, Австрією, Німеччиною, Великою Британією, Голландією, США, Бельгією, Росією, Японією, Індією. Фахівці цих країн часто приїждять до України для проведення спільних досліджень, завжди дають найвищі оцінки українській низькочастотній радіоастрономії. Зарубіжні організації в цій галузі розробляють власні проекти, в багатьох

із них українські системи відіграють ключову роль, зокрема в майбутньому місячному проекті Far Side Explorer (ESA-NASA).

Останнім часом було експериментально і теоретично доведено переваги українських систем УТР-2 — ГУРТ — УРАН порівняно з сучасними закордонними системами, наприклад з LOFAR, особливо на частотах менш як 30 МГц. Вітчизняні установки на найбільш низьких радіочастотах і досі є незамінними у світі завдяки кращим чутливості, завадостійкості, роздільній здатності. Зазначимо, що сумарна ефективна площа українських інструментів, 300 000 м², у кілька разів перевищує площу всіх закордонних НЧ-радіотелескопів!

За результатами робіт 2010—2013 рр. опубліковано понад 60 статей у журналах з високим імпаکت-фактором, близько 80 доповідей на міжнародних конференціях, захищено 1 докторську і 3 кандидатські дисертації, підготовлено ще 3 докторські й 6 кандидатських дисертацій.

Слід підкреслити, що в умовах жорсткої світової наукової конкуренції за результатами виконання цільової програми НАН України в українській НЧ-радіоастрономії було зроблено низку принципових астрофізичних відкриттів, визнаних світовою науковою громадськістю. Серед них передусім варто відзначити такі:

- виявлення рекордно високих (понад 1000) рідбергівських станів міжзоряних атомів;
- виявлення наземними засобами радіовипромінювання грозових розрядів на Сатурні та його надтонкої мікросекундної структури випромінювання;
- виявлення імпульсного декаметрового радіовипромінювання 40 пульсарів і нове визначення їх міри дисперсії;
- виявлення нових особливостей спорадичного радіовипромінювання Сонця, Юпітера, міжпланетного середовища з різноманітною тонкою частотно-часовою структурою;
- виявлення протяжних низькочастотних гало поблизу радіогалактик і квазарів методами радіоінтерферометрії з наддовгими базами;
- реалізація пошукових досліджень з рекордною чутливістю транзйентних явищ у

Всесвіті (екзопланети, активні зірки, магнетари, джерела гамма-сплесків);

- доведення широких можливостей низькочастотних радіоастрономічних досліджень Всесвіту з необхідними і достатніми чутливістю, роздільною здатністю, завадостійкістю та інформативністю.

Ці відкриття назавжди увійдуть до скарбниці світової науки і вже нині створюють надійне і перспективне астрофізичне підґрунтя для майбутніх комплексних вітчизняних і міжнародних досліджень.

Отже, українські низькочастотні радіоастрономічні дослідження сьогодні є тісно інтегрованими в європейську радіоастрономічну науку. На тлі бурхливого розвитку низькочастотної радіоастрономії у світі Україна впевнено зберігає (вже 50 років поспіль!) світовий пріоритет у цій актуальній галузі фундаментальної науки. Для його подальшого збереження і розвитку необхідно і доцільно продовжити дію відповідної цільової програми НАН України з новими завданнями та цілями.

Висновки

Уже протягом 50 років Україна є лідером в актуальному напрямі сучасної астрономічної науки, який бурхливо розвивається в усьому світі, — низькочастотній радіоастрономії. Наукова школа, створена видатним ученим академіком НАН України С.Я. Брауде, впевнено розвивається і здобула заслужене визнання світової спільноти.

Останнім часом досягнуто значного прогресу у вітчизняній низькочастотній (декаметровий — метровий діапазони хвиль) радіоастрономії передусім завдяки виконанню цільової програми НАН України «Модернізація радіотелескопа УТР-2 і перспективний розвиток декаметрової радіоастрономії в Україні». Проведено суттєву модернізацію апаратних засобів і методів на найбільших у світі радіотелескопах УТР-2 і УРАН (діапазон 8—32 МГц), що підвищило інформативність цих інструментів у тисячі разів. На обсерваторії ім. С. Я. Брауде біля УТР-2 створено і впроваджено в дію радіотелескоп нового покоління ГУРТ зі смугою

досліджень 8–80 МГц. Відповідні розробки ґрунтувалися на найсучасніших інформаційних, комп'ютерних, цифрових і ґрид-технологіях. За основними параметрами (чутливість, роздільна здатність, завадостійкість, ефективність) українські інструменти перевершують закордонні. Усе це дало змогу зробити низку важливих астрофізичних відкриттів у вітчизняних і міжнародних дослідженнях Сонячної системи, Галактики і Метагалактики.

Українські системи залишаються найкращими у світі, особливо в дослідженнях на частотах, менших за 30 МГц, що дозволяє інтегрувати їх у престижні міжнародні проекти. Для подальшого розвитку низькочастотної радіоастрономії в Україні, збереження і розвитку світового пріоритету доцільно і потрібно продовжити виконання відповідної цільової програми НАН України на найближчі роки.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Брауде С.Я., Мень А.В., Содін Л.Г. Радіотелескоп декаметрових хвиль УТР-2 // Антени. — 1978. — Т. 26. — С. 3–15.
2. Мень А.В., Брауде С.Я., Рашковський С.Л. та ін. Радіоінтерферометрична система УРАН декаметрового діапазона хвиль // Радіофізика і радіоастрономія. — 1997. — Т. 2, № 4. — С. 385–401.
3. Брауде С.Я., Мень А.В. Декаметрова радіоастрономія в Україні // Радіофізика і радіоастрономія. — 1996. — Т. 1, № 1. — С. 9–24.
4. Lecacheux A., Konovalenko A.A., Rucker H.O. Using large radio telescopes at decameter wavelength // Planet. Space Sci. — 2004. — V. 52. — P. 1357–1374.
5. Коноваленко О.О. Перспективи низькочастотної радіоастрономії // Радіофізика і радіоастрономія. — 2005. — Т. 10. — С. S86–S114.
6. Abranin E.P., Bruck Yu.M., Zakharenko V.V., Konovalenko A.A. The new preamplification system for UTR-2 radio telescope // Exp. Astron. — 2001. — V. 11. — P. 85–112.
7. Konovalenko A.A. Ukraine decameter wave radio astronomy systems and their perspectives // Radio Astronomy at Long Wavelengths. — American Geophysical Union, 2000. — P. 311–319.
8. Van Haarlem M.P., Wise M.W., Gunst A.V. et al. LOFAR: the low-frequency array // A&A. — 2013. — V. 650. — P. 1–56.
9. Taylor G.B., Ellingson S.W., Kassim N.E. et al. First light for the first station of the Long Wavelength Array // J. Astron. Instrum. — 2012. — V. 50004. — P. 1–29.
10. Ryabov V.B., Vavrić D.M., Zarka P. et al. A low-noise, high dynamic range digital receiver for radio astronomy applications: an efficient solution for observing radio-bursts from Jupiter, the Sun, pulsars and other astrophysical plasmas below 30 MHz // A&A. — 2010. — V. 510. — P. 16–28.
11. Konovalenko A.A., Falkovich I.S., Rucker H.O. et al. New antennas and methods for the low frequency stellar and planetary radio astronomy // Planetary Radio Emission VII / eds. H.O. Rucker, W.S. Kurth, P. Loran, G. Fisher. — 2010. — P. 521–532.
12. Konovalenko A.A., Falkovich I.S., Kalimichenko N.N. et al. Thirty-elements active antenna array as a prototype of a huge low-frequency radio telescope // Exp. Astron. — 2005. — V. 16, N 3. — P. 149–164.
13. Falkovich I.S., Konovalenko A.A., Gridin A.A. et al. Wide-band high linearity active dipole for low frequency radio astronomy // Exp. Astron. — 2011. — V. 32. — P. 127–145.
14. Станіславський О.О., Абранін Е.П., Коноваленко О.О., Коваль А.О. Геліограф радіотелескопа УТР-2 // Радіофізика і радіоастрономія. — 2011. — Т. 16, № 1. — С. 5–14.
15. Zakharenko V.V., Vasylieva I.Y., Konovalenko A.A. et al. Detection of decameter-wavelength pulsed radio emission of 40 known pulsars // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. — 2013. — V. 431. — P. 3624–3641.
16. Petrova S.A. Physics of interpulse emission in radio pulsars // Astrophys. J. — 2008. — V. 673. — P. 400–410. A&A. — 2009. — V. 493. — P. 651–660.
17. Konovalenko A.A., Sodin L.G. The 26.13 MHz line in the direction of Cassiopeia A // Nature. — 1981. — V. 294. — P. 135–136.
18. Stepin S.V., Konovalenko A.A., Kantharia N.G., Udaya Shankar N. Radio recombination lines from the largest bound atoms in space // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. — 2007. — V. 374. — P. 852–856.
19. Stanislavsky A.A., Koval A.A., Konovalenko A.A. Low-frequency heliographic of the quiet Sun corona // Astron. Nachr. — 2013. — V. 334, N 10. — P. 1086–1092.

20. *Konovalenko A.A., Kalinichenko N.N., Rucker H.O. et al.* 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. — V. 224. — P. 14–23.
21. *Zakharenko V., Mylostna C., Konovalenko A. et al.* Ground-based and spacecraft observations of lightning activity on Saturn // *Planet. Space Sci.* — 2012. — V. 61. — P. 53–59.
22. *Zarka P., Farrell W., Fischer G., Konovalenko A.* Ground-based and space-based radio observations of planetary lightning // *Space Sci. Rev.* — 2008. — V. 137. — P. 257–269.
23. *Konovalenko A.A., Stanislavsky A.A., Rucker H.O. et al.* Synchronized, observations by using the SEREO and the largest ground based decameter radio telescope // *Exp. Astron.* — 2013. — V. 36. — P. 137–154.
24. *Zarka P., Bougeret J.-L., Briand C. et al.* Planetary and exoplanetary low frequency radio observations from the Moon // *Planet. Space Sci.* — 2012. — V. 74. — P. 156–166.
25. *Stanislavsky A.A., Konovalenko A.A., Rucker H.O. et al.* Antenna performance for decameter solar radio observations // *Astron. Nachr.* — 2009. — V. 330, N 7. — P. 691–697.
26. *Litvinenko G.V., Lecacheux A., Konovalenko A.A. et al.* Modulation structures in the dynamic spectra of Jovian radio emission obtained with high time-frequency resolution // *A&A*. — 2009. — V. 493. — P. 651–660.
27. *Briand C., Zaslavsky A., Maksimovic M. et al.* Faint solar structures from decametric observations // *A&A*. — 2008. — V. 490. — P. 339–344.
28. *Melnik V.N., Konovalenko A.A., Rucker H.O. et al.* Observations of powerful Type III bursts in the frequency range 10–30 MHz // *Solar Phys.* — 2011. — V. 269, N 2. — P. 335–350.

A.A. Коноваленко

Радиоастрономический институт НАН Украины
ул. Краснознаменная, 4, Харьков, 61002, Украина

ОБ ИТОГАХ ВЫПОЛНЕНИЯ ЦЕЛЕВОЙ КОМПЛЕКСНОЙ ПРОГРАММЫ
НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НАН УКРАИНЫ «МОДЕРНИЗАЦИЯ РАДИОТЕЛЕСКОПА УТР-2
И ПЕРСПЕКТИВНОЕ РАЗВИТИЕ ДЕКАМЕТРОВОЙ РАДИОАСТРОНОМИИ В УКРАИНЕ»

Показаны современное состояние и перспективы низкочастотной радиоастрономии в Украине. Радиотелескопы декаметровых волн УТР-2 и УРАН на диапазон 8–32 МГц остаются крупнейшими в мире и лучшими по информативности в исследованиях космического радиоизлучения. Благодаря комплексной модернизации радиотелескопов, созданию дополнительного инструмента ГУРТ нового поколения на диапазон 8–80 МГц с использованием современных информационных и телекоммуникационных технологий, удалось сделать ряд важных астрофизических открытий. Украинские низкочастотные радиоастрономические средства с их дальнейшей модернизацией являются перспективными для отечественных и международных научных проектов, сохраняют и развивают приоритет Украины в этой актуальной области фундаментальной науки.

Ключевые слова: низкочастотная радиоастрономия, радиотелескоп, цифровая регистрация сигналов, астрофизический объект.

A.A. Konovalenko

Institute of Radio Astronomy of National Academy of Sciences of Ukraine
4 Krasnoznamennaja St., Kharkov, 61002, Ukraine

ON THE RESULTS OF THE COMPLETION OF THE SPECIAL COMPLEX SCIENTIFIC
INVESTIGATIONS PROGRAM OF NASU “MODERNIZATION OF THE UTR-2 RADIO TELESCOPE
AND PERSPECTIVE DEVELOPMENT OF LOW FREQUENCY RADIO ASTRONOMY IN UKRAINE”

The current status and the perspectives of low frequency radio astronomy in Ukraine are shown. UTR-2 and URAN decameter waves radio telescopes for the range of 8–32 MHz are still largest in the world and the best in the informativeness. Some important astrophysical detections were carried out due to deep upgrade of the radio telescopes as well as due to the creation of the additional GURT instrument for the range of 8–80 MHz. Modern information and telecommunication technologies were implemented. Ukrainian low frequency radio astronomy means with their future upgrade have good perspectives for the national and international scientific projects. They are keeping and developing Ukrainian priority in this actual field of the basic science.

Keywords: low frequency radio astronomy, radio telescope, digital signal recording, astrophysical object.