



КОНОВАЛЕНКО

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

<https://orcid.org/0000-0003-1949-9625>

ПРО РЕЗУЛЬТАТИ ВИКОНАННЯ ЦІЛЬОВОЇ ПРОГРАМИ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ НАН УКРАЇНИ «РОЗВИТОК, СТВОРЕННЯ ТА ВИКОРИСТАННЯ НАЙБІЛЬШИХ У СВІТІ УКРАЇНСЬКИХ НИЗЬКОЧАСТОТНИХ РАДІОАСТРОНОМІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ І СИСТЕМ» НА 2014 – 2017 роки

За матеріалами наукової доповіді на засіданні Президії НАН України 27 грудня 2017 року

Виконання протягом 2014–2017 рр. цільової комплексної програми НАН України «Розвиток, створення та використання найбільших у світі українських низькочастотних радіоастрономічних елементів і систем» було дуже важливим для розвитку вітчизняної і навіть світової низькочастотної радіоастрономії. Зараз у всьому світі спостерігається бурхливий прогрес цієї науки, створюються нові радіотелескопи, але наша країна і сьогодні залишається світовим лідером. На найбільших радіотелескопах декаметрових хвиль УТР-2 і УРАН було не лише принципово модернізовано засоби та методи спостережень, а й істотно розширено функціональні можливості та діапазон робочих частот завдяки створенню додаткових антен ГУРТ нового покоління. Реалізація скоординованих багатоантенних міжнародних досліджень з використанням найчутливіших вітчизняних радіотелескопів, закордонних наземних інструментів і космічних місій дозволила отримати багато пріоритетних результатів у галузі вивчення об'єктів Всесвіту.

Ключові слова: низькочастотна радіоастрономія, радіотелескоп, багатоантенні спостереження, цифрова реєстрація сигналів, Сонячна система, Галактика, Метагалактика.

Сучасна радіоастрономія охоплює дуже широкий діапазон електромагнітних хвиль космічного радіовипромінювання – від міліметрових до кілометрових (частоти від 300 ГГц до 300 кГц). При цьому спостереження у найбільш довгохвильових – метровому, декаметровому, гектометровому діапазонах (частоти, менші за 300 МГц) посідають особливе місце в астрономічній науці. Зумовлено це не тільки і не стільки тим, що

85 років тому радіоастрономія як наука народилася саме в декаметровому діапазоні хвиль на частоті близько 15 МГц завдяки роботам американського радіоінженера Карла Янського. Більш важливим є те, що початок систематичних радіоастрономічних досліджень на декаметрових хвилях відкрив принципово нове «вікно» у Всесвіт, який виявився абсолютно не таким, яким його бачило людство протягом багатьох тисячоліть. Поступово ставали зрозумілими фізичні причини наявності таких незвичайних і екзотичних астрофізичних об'єктів та явищ.

Якщо в оптичній астрономії головним механізмом випромінювання є тепловий (Сонце, зорі, емісійні туманності, планети тощо), то в радіоастрономії, особливо низькочастотній, значну перевагу мають так звані нетеплові механізми. Більш детально їх сутність буде пояснено нижче, але саме завдяки їм низькочастотна радіоастрономія почала давати інформацію, недоступну іншим методам астрофізики. Півстоліття тому космічна ера зробила астрономію всехвильовою, тобто завдяки позаатмосферним спостереженням за допомогою космічних апаратів з відповідними телескопами стали можливими дослідження в інфрачервоному, ультрафіолетовому, рентгенівському і гамма-діапазонах. Останнім часом можна також говорити про нейтринну астрономію, космічну променеви і навіть гравітаційну (Нобелівська премія з фізики за 2017 р.). Нагадаємо, що декаметрове і метрове космічне радіовипромінювання є гранично низькочастотним для спостережень з поверхні Землі.

Одним із перших оцінив астрофізичну значущість радіоастрономії декаметрових хвиль видатний учений академік НАН України Семен Якович Брауде (1911–2003). Під його керівництвом почалося створення високоєфективної експериментальної бази, причому з урахуванням специфічних вимог до техніки і методів спостережень, пов'язаних з багатьма негативними факторами, притаманними саме гранично низькочастотним дослідженням. У результаті близько 50 років тому під Харковом було побудовано унікальний найбільший

у світі радіотелескоп УТР-2. Згодом у різних місцях України на відстанях до 1000 км з півдня на північ і зі заходу на схід було споруджено ще чотири радіотелескопи серії УРАН. Неможливо не згадати з великою вдячністю постійну підтримку, яку починаючи з 1960-х років і дотепер надають цьому проекту керівництво НАН України та особисто її президент Борис Євгенович Патон.

Слід підкреслити, що С.Я. Брауде і Б.Є. Патон не помилилися з вибором напряму досліджень — було створено всесвітньо відому наукову школу, отримано величезний обсяг пріоритетних астрофізичних результатів, визнаних світовою радіоастрономічною спільнотою. Більше того, українські вчені довели високу астрофізичну інформативність низькочастотної радіоастрономії, що підштовхнуло провідні радіоастрономічні установи світу розпочати створення великих інструментів нового покоління, таких як LOFAR (Європа), LWA (США), MWA (Австралія). На створення цих систем уже витрачено мільярди доларів, частково вони вже функціонують, і їх продовжують активно розбудовувати.

Проте й досі в низькочастотній радіоастрономії Україна зберігає пріоритет. Радіотелескопи УТР-2 і УРАН є національним надбанням країни, вони не лише активно працюють, а й в останні роки істотно (у тисячі разів!) підвищили свої параметри та інформативність. Більше того, з метою подальшого збереження світового лідерства вітчизняної низькочастотної радіоастрономії на обсерваторії ім. С.Я. Брауде поруч з УТР-2 зараз створюється радіотелескоп нового покоління ГУРТ, який має втричі більшу смугу частот, а за такими характеристиками, як чутливість, завадостійкість і функціональні можливості, перевершує закордонні аналоги. Такий прогрес став можливим насамперед завдяки виконанню академічної цільової програми «Розвиток, створення та використання найбільших у світі українських низькочастотних радіоастрономічних елементів і систем». Основні науково-технічні та астрофізичні результати виконання Програми наведено в цьому огляді.

Експериментальна база сучасної низькочастотної радіоастрономії в Україні

У цьому розділі коротко описано вітчизняні радіотелескопи УТР-2 і УРАН після їх модернізації, а також додатковий радіотелескоп нового покоління ГУРТ. Наведено головні параметри, нові функціональні можливості антен, приймально-реєструвальних систем і програмно-апаратних засобів.

Радіотелескопи УТР-2 і УРАН. Під час створення інструментів для низькочастотної радіоастрономії і проведення відповідних спостережень доводиться стикатися з такими апаратно-методичними проблемами:

- 1) висока яскрава температура галактичного фону;
- 2) земні завади (природні, штучні, вузько- і ширококутові, зовнішні і внутрішні);
- 3) вплив іоносфери (рефракція, мерехтіння, поглинання);
- 4) низька кутова роздільна здатність одного радіотелескопа.

Для подолання цих проблем потрібні:

- велика ефективна площа і лінійні розміри радіотелескопа, його оптимальна конфігурація;
- висока спрямованість антен;
- малий рівень бічних пелюсток;
- висока якість заповнення UV-площини;
- відомі параметри земних завад та іоносфери, їх регулярний моніторинг;
- високий динамічний діапазон антенного підсилення та інших антенних вузлів;
- широкий динамічний діапазон, високе частотне і часове розділення реєструвальної апаратури;
- ширококутова антена;
- багатопробієвий прийом (ON-OFF-режими), просторова селекція, картографування;
- надійне екранування апаратури і кабельних систем;
- урахування часу і сезону спостережень;
- спеціальна обробка, ідентифікація та пошук ознак завадових і корисних сигналів (очищення, фільтрація, розпізнавання образів);

- значна спостережна статистика та повторюваність результатів, досягнення великого відношення сигнал—шум (>5).

Крім того, як було показано українськими астрономами, ефективними методами подолання зазначених проблем є багатоантенні та позаіоносферні спостереження (радіоінтерферометрія в режимах Земля—Земля, Земля—Космос, Космос—Космос), а також спостереження на зворотному боці Місяця.

Усі ці вимоги було враховано під час створення і, особливо, модернізації радіотелескопа УТР-2 в останні роки. У результаті він і досі залишається найбільшим у світі і найкращим за чутливістю та функціональністю в діапазоні частот 8—32 МГц (і навіть до 40 МГц). Його величезна ефективна площа (~ 150 тис. м²) і лінійні розміри (2×1 км) забезпечують рекордну чутливість до одиниць міліянських (мЯн) і кутову роздільну здатність 25' [1] (рис. 1).

У 70—80-х роках на основі радіотелескопа УТР-2 було побудовано систему декаметрових інтерферометрів УРАН для спостереження радіоджерел у режимі РНДБ (радіоінтерферометрія з наддовгими базами) [1].

Крім УТР-2 до неї входять ще 4 достатньо великих радіотелескопи серії УРАН з ефективними площами від 28 тис. до 7 тис. м², які разом створюють бази довжиною від 42 до 950 км і дають рекордну кутову роздільну здатність на рівні кількох кутових секунд, забезпечуючи поляриметричні можливості. На рис. 2 показано розміщення цих радіотелескопів на території України і наведено відстані між ними. Радіотелескопи УТР-2, УРАН-1 і УРАН-4 належать Радіоастрономічному інституту 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. Організовано практично безперервну роботу інструментів як координовано, в режимах РНДБ і синхронних спостережень, так і автономно за багатьма науковими програмами.

Постійний прогрес електронної, цифрової, комп'ютерної техніки та інформаційних технологій стимулює модернізацію експерименталь-

них засобів і методів спостережень. Останніми роками вона активно проводиться на радіотелескопах УТР-2 і УРАН. Було принципово поліпшено параметри антенних елементів, систем антенного підсилення, дистанційного керування, контролю, калібрування, автоматизації, реєстрації, архівації, передачі і обробки даних. Впроваджено нові методи вимірювання параметрів елементів і систем телескопів та їх розрахунки. Спеціальні системи реєстрації сигналів на основі цифрових спектральних процесорів і FPGA-технологій мають такі параметри [2]: смуга аналізу — 33 МГц, кількість каналів — 8192, частотна і часова роздільні здатності — 4 кГц і 0,25 мс, розрядність аналого-цифрового перетворювача — 16, динамічний діапазон — 90 дБ. Є п'ять (відповідно до кількості променів УТР-2) двохдовгих (для антен Південь-Північ і Схід-Захід) комплектів апаратури, ще два подібних реєстратори впроваджено на УРАН-2 і УРАН-3. Всі прилади можуть працювати у режимах швидкого фур'є-аналізу в реальному часі з визначенням авто-спектрів, комплексних крос-спектрів та у режимі wave-form. До речі, торік на радіотелескопах УТР-2 і УРАН-2 вперше впроваджено й успішно випробувано новий режим РНДБ з використанням вищезгаданих максимально широкосмугових реєстраторів, що відкриває принципово нові можливості для досліджень.

Інформативність модернізованих радіоастрономічних установок зросла у тисячі разів. Так, зараз загальна кількість частотних каналів на УТР-2 становить 81 920, а раніше їх було лише 60. Таким чином на радіотелескопах УТР-2 і УРАН забезпечується найкраще для декаметрового діапазону поєднання параметрів антен і апаратури. Ці параметри разом з розробленими методами спостережень дозволяють якісно і надійно вивчати Всесвіт, а також максимально знизити вплив негативних факторів низькочастотної радіоастрономії.

Радіотелескоп нового покоління ГУРТ (Гігантський український радіотелескоп).

Бурхливий прогрес низькочастотної радіоастрономії у світі пов'язаний зі створенням ра-



Рис. 1. Антена Схід-Захід радіотелескопа УТР-2 в день осіннього рівнодення. 2017 р.

діотелескопів нового покоління. Найбільші з них — LOFAR, центральна частина якого знаходиться в Нідерландах, а окремі станції встановлено у Німеччині, Франції, Великій Британії, Швеції, Ірландії, Польщі, призначений для спостережень у діапазонах (10)30–80 МГц і 110–240 МГц; LWA в США працює на частотах 20–80 МГц; MWA в Австралії має діапазон спостережень 50–300 МГц; SKA-low — 200–1000 МГц. У цих системах для забезпечення високої чутливості, високої роздільної здатності, великого поля зору і розширених можливостей картографування використано останні досягнення електронних, телекомунікаційних та інформаційних технологій.

Однак українські радіотелескопи УТР-2 і УРАН за головними параметрами поки що залишаються неперевершеними, особливо на частотах, менших за 30 МГц, які є особливо цінними для астрофізики. Щоб не втратити свої лідерські позиції в майбутньому, в Україні в рамках виконання цільової програми НАН України розпочато створення радіотелескопа нового покоління ГУРТ [1, 3]. Цей проект спрямовано на поступову реалізацію великої адитивної ефективної площі понад 10^4 м² з високим фактором заповнення елементів та широким діапазоном частот 8–80 МГц (втричі більшим, ніж в УТР-2 та УРАН), забезпечення максимальної завадостійкості і динамічного діапазону аж до гранично низьких частот близь-

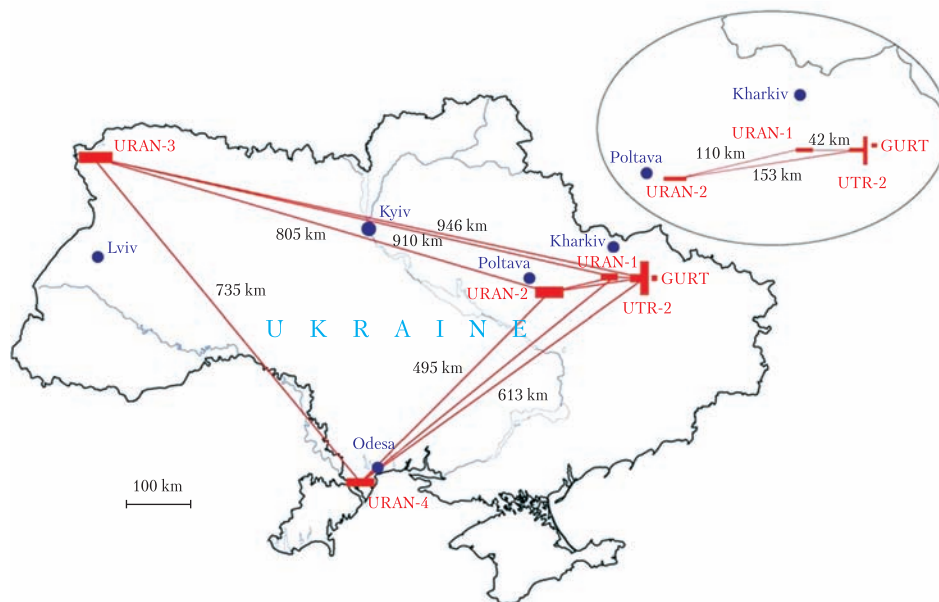


Рис. 2. Розміщення на території України радіотелескопів УТР-2, УРАН і ГУРТ

ко 8 МГц, високої чутливості і рівномірності коефіцієнта передачі в усій робочій смузі частот. Особлива увага приділяється підвищенню якості «серця» антенної решітки – активного антенного елемента [4].

Радіотелескоп ГУРТ (рис. 3) складається з 25 елементних активних субрешіток з аналоговим часовим фазуванням окремих субрешіток та цифровим фазуванням між ними. На сьогодні системи підсилення, фазування, телекомунікацій, контролю, керування вже встановлено на 5 субрешітках (з 11 змонтованих), і вони використовуються у спостереженнях. Надширокосмугова цифрова система реєстрації нового покоління має широкі функціональні можливості, забезпечує смугу аналізу 80 МГц, кількість каналів – 16 384, два входи, частотне і часове розділення у режимі фур'є-аналізу реального часу – 6 кГц і 2 мс (у режимі waveform – без обмежень), розрядність АЦП – 16 біт, динамічний діапазон – 90 дБ.

В останні роки в системі ГУРТ було значно поліпшено параметри і функціональні можливості. Впроваджено нові системи цифрового керування, в тому числі канали зв'язку з головним лабораторним приміщенням УТР-2 і об-

мін інформацією інтернет-каналами. Підвищено термостабільність, рівномірність коефіцієнта передачі і динамічний діапазон системи розподіленого підсилення нового типу. Досягнуто високого збігу виміряних на ГУРТ параметрів з теоретичними розрахунками, що відкриває новий підхід до калібрування параметрів і з'ясування абсолютних значень енергетичних параметрів випромінювання [4].

Розробки і дослідження українських учених визнано і високо оцінено світовою радіоастрономічною спільнотою. Активно розвивається співпраця з установами Франції, Австрії, Німеччини, Нідерландів, Великої Британії, Ірландії, Бельгії, Індії, Швеції, Японії, США. Особливо слід відзначити плідні 25-річні стосунки з Паризькою обсерваторією CNRS (Франція), Інститутом космічних досліджень (Австрія) та Комісією з астрономії Австрійської академії наук. У Франції за участю українських фахівців споруджується новий радіотелескоп NenuFAR, який має подібні до ГУРТу структуру і параметри. В Австрії (обсерваторія Люстбюгель) обґрунтовано і підтримано проект зі створення субрешітки ГУРТ.

Нові методи низькочастотних радіоспостережень

Крім необхідності забезпечення високих технічних вимог до антен та приймально-реєструвальних систем, для зниження впливу негативних факторів надзвичайно важливим є використання спеціальних методів спостережень [1]. Нижче перелічено ті з них, що були запропоновані та апробовані під час виконання Програми.

Багатоантенні спостереження. В останні роки було показано, що одним із найбільш радикальних шляхів зменшення впливу негативних факторів у низькочастотній, особливо декаметровій, радіоастрономії і підвищення надійності та якості вимірювань у цілому є синхронне координоване використання великих антен, рознесених на відстані від одиниць до тисяч кілометрів (запропоновано новий термін «багатоантенна синергія») [5].

Ідея полягає в тому, що в різних географічних пунктах параметри іоносфери та завадових сигналів сильно відрізняються. Тому одночасні спостереження одних і тих самих астрофізичних об'єктів і порівняння відповідних динамічних спектрів дають змогу виділити у цих спектрах особливості, що не збігаються між собою. Цей незбіг зумовлений тим, що короткочасові сплески випромінювання (дуже «схожі» на корисні сигнали) майже завжди спричинені іоносферними мерехтіннями, які дуже різняться навіть на відстанях у десятки кілометрів. Водночас, коли подібні сплески збігаються, можна досить впевнено стверджувати, що вони виникли в об'єктах далекого космосу.

Так само можна ідентифікувати корисні та вузько- і ширококутові радіозавадні сигнали, порівнюючи спектри, синхронно виміряні в рознесених пунктах. Було показано, що для надійної ідентифікації слабких спорадичних сигналів (активні зорі, гамма-сплески, транзієнти) тільки за допомогою багатоантенних спостережень можна довести астрофізичну природу задетектованих сигналів.

Останнім часом проведено успішні спостереження Сонця, Юпітера, Сатурна, пульсарів,



Рис. 3. Субрешітки ширококутового радіотелескопа нового покоління ГУРТ

екзопланет та інших об'єктів за допомогою радіотелескопів УТР-2, УРАН, ГУРТ (Україна); NDA, NenuFAR (Франція), LOFAR (Нідерланди), LWA (США) (рис. 4). Найбільша у світі база низькочастотних багатоантенних спостережень між Україною та США становила близько 8 тис. км (для порівняння: діаметр Землі дорівнює 12 тис. км). При цьому було не лише досягнуто значного підвищення ефективності і надійності експериментів, а й здійснено детектування нового явища — променевої структури S-випромінювання планети Юпітер [6].

Наземно-космічна радіоастрономія. Як відомо, космічне радіовипромінювання на частотах, менших за 10 МГц, до поверхні Землі не досягає. Це зумовлено екрануючим впливом (поглинанням) іоносфери на висотах 100–200 км. Тому практично від самого початку космічної ери на багатьох космічних апаратах встановлювали низькочастотні антени. Знаходячись вище земної іоносфери, ці прилади могли прийняти космічне радіовипромінювання на частотах, менших за 10 МГц, навіть до десятків кілогерців. Цікаво, що першим, хто передбачив таку можливість використання наднизькочастотної радіоастрономії (а це було через рік після запуску першого супутника), був видатний астрофізик Й.С. Шкловський (1916–1985). Він народився у м. Глухові Сумської області, і торік астрономічна спільнота України і світу відзначала його 100-річний ювілей [7].



Рис. 4. Розміщення низькочастотних радіотелескопів у Європі



Рис. 5. Радіотелескопи УТР-2 і ГУРТ в обсерваторії ім. С.Я. Брауде

В останні роки у Європі (ESA) та США (NASA) було реалізовано спеціальні космічні місії з низькочастотними радіоприладами (Galileo, Ulysses, WIND, Cassini, Juno, STEREO та ін.). Однак у цих проєктів був очевидний недолік. Оскільки на космічному апараті можна встановити лише малу антену (всього один диполь), вимірювання мають дуже низьку чутливість, і багато важливих астрофізичних явищ залишаються невивченими. Однак українські радіоастрономи запропонували новий методичний підхід — низькочастотну наземно-космічну радіоастрономію [5]. Експерименти реалізуються синхронно (як описано в попередньому розділі) на космічних апаратах і за допомогою найбільших наземних низькочас-

тотних радіотелескопів, серед яких особливе місце посідають українські інструменти. Чутливість УТР-2 у тисячі разів вища, ніж у космічних приладів. Крім того, маємо впевнене перекриття діапазонів частот: 8–32 МГц для УТР-2 і 1–30 МГц для космічних телескопів, що забезпечує надійну «зшивку» і відповідний сумісний аналіз динамічних спектрів. Такий режим суттєво підвищує ефективність низькочастотних експериментів. Це підтверджено багатьма наземно-космічними вимірюваннями, проведеними за допомогою УТР-2, УРАН, ГУРТ та інших телескопів і космічних місій WIND, Cassini, STEREO та ін. Зокрема, завдяки синхронним спостереженням на УТР-2 і Cassini (на орбіті навколо Сатурна) вдалося надійно задетектувати радіосигнали від блискавок в атмосфері планети-гіганта. У зв'язку із завершенням місії Cassini у 2017 р. наземні дослідження цього явища на українських радіотелескопах будуть особливо цінними у наступні десятиліття.

Важливі результати отримано під час синхронних досліджень на УТР-2, УРАН, ГУРТ і космічній місії STEREO [8]. Через поломку одного з двох апаратів STEREO, які працювали у стереоскопічному режимі, тепер тільки наземна синхронна підтримка місії може зберегти заданий режим.

У 2016 р. розпочалася дуже важлива юпітеріанська місія Juno. До наземної підтримки цього проєкту офіційно залучено всі українські радіотелескопи.

Використання малорозмірних низькочастотних радіотелескопів нового покоління.

Українські радіотелескопи працюють практично безперервно, беручи участь у багатьох програмах з комплексних досліджень Всесвіту. Організація робіт на велетенських наукових установах — непросте завдання з огляду на людські ресурси, складність експлуатації приладів, необхідність їх ремонту та енерговитрати. Проведено великий обсяг робіт з підвищення рівня автоматизації усіх функцій інструментів, зокрема дистанційного доступу до керування технікою і збирання інформації через інтернет-канали.

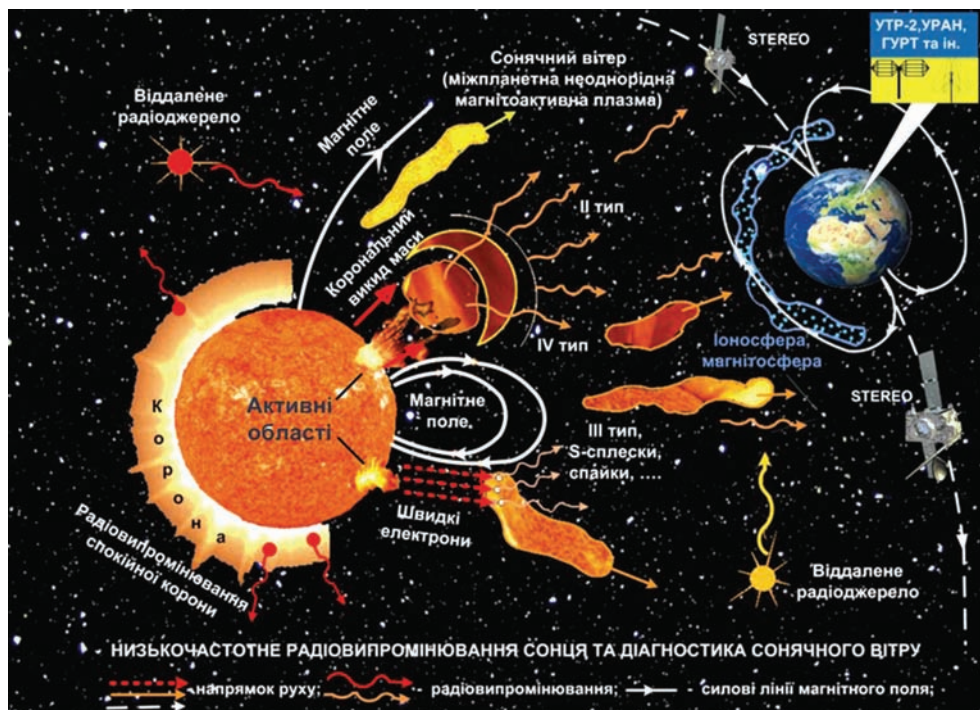


Рис. 6. Дослідження Сонця і міжпланетного середовища за допомогою наземних радіотелескопів УТР-2, УРАН, ГУРТ і космічної місії STEREO

Однак під час створення і початку експлуатації радіотелескопа ГУРТ (навіть лише однієї 25-елементної субрешітки) неочікувано виявилися позитивні обставини. З'ясувалося, що порівняно мала антена є високоефективним та інформативним інструментом для вивчення багатьох об'єктів і явищ: Сонця, планет, міжпланетного середовища, міжзоряного середовища і спектральних ліній, галактичного і метagalактичного фону, пульсарів, космологічних ефектів [3]. Широкі можливості використання субрешіток ГУРТ визначаються, зокрема, надширокою смугою частот антен і систем реєстрації; високою чутливістю за яскравісною температурою; завадостійкістю; рівномірністю коефіцієнта передачі; електронним скануванням неба; поляриметричними можливостями; високим фактором заповнення елементів; моніторингом параметрів ґрунту, завад, стану іоносфери; гарним збігом теоретичних розрахунків параметрів антен та експериментальних даних; високим ступенем автоматизації; роз-

виненим програмним забезпеченням; надійністю; простою експлуатації; економічністю; екологічною безпекою.

Зараз субрешітки ГУРТ працюють у різних режимах і задіяні в багатьох наукових програмах, у тому числі синхронних спостереженнях з радіотелескопом УТР-2 та іншими інструментами наземного і космічного базування (рис. 5).

Нові астрофізичні результати низькочастотної радіоастрономії

Нижче наведено окремі результати, отримані під час виконання цільової програми. Вони пов'язані з вивченням континуального, імпульсного, монохроматичного, спорадичного, поляризованого типів низькочастотного радіовипромінювання, а також з різноманітними об'єктами у Сонячній системі, Галактиці і Метagalактиці. Одержані результати опубліковано в численних статтях, матеріалах міжна-

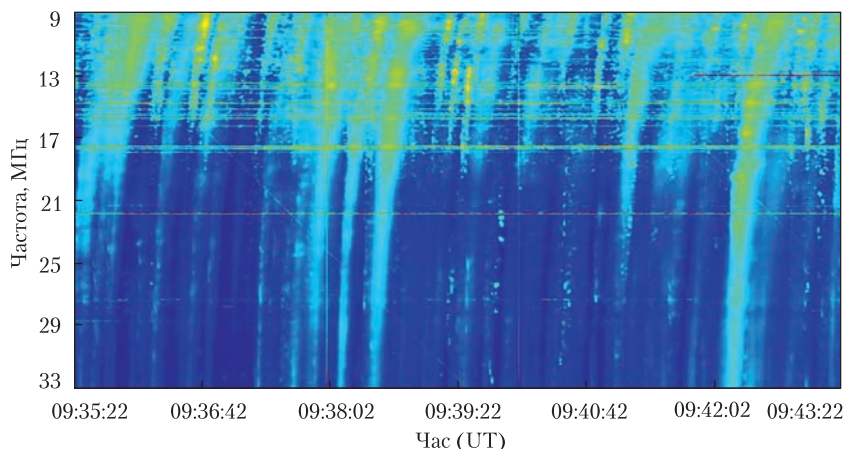


Рис. 7. Відкриття нових типів і надтонкої структури декаметрового спорадичного сонячного радіовипромінювання

родних конференцій та узагальнено в оглядах [1, 3, 5, 7].

Сонце і міжпланетне середовище. Сонце як об'єкт завжди було, є і буде дуже важливим для досліджень у всіх діапазонах електромагнітного спектра. На рис. 6 схематично зображено структуру Сонячної системи та напрями дослідження Сонця і міжпланетного середовища. Низькочастотні радіоспостереження на УТР-2 та УРАН дозволили виявити велику кількість типів спорадичного сонячного радіовипромінювання та його особливості, зокрема тонкі частотно-часові структури. Це можна проілюструвати за допомогою динамічного спектра (тривимірне зображення: час—частота—інтенсивність, остання позначається кольором), на якому видно багато сплесків III типу і спайків, тобто вузьких за смугою частот і коротких за часом подій (рис. 7).

Вдалося зареєструвати сонячне радіовипромінювання навіть на частотах, менших за 10 МГц, що раніше для наземних інструментів у світі вважалося неможливим через негативний вплив іоносфери і завади, особливо вдень, коли Сонце тільки й можна спостерігати.

До досліджень Сонця близькі дослідження сонячного вітру (міжпланетного середовища) методом міжпланетних мерехтінь. Відкрито

явище мерехтінь для міжпланетної плазми навіть за орбітою Землі. Спеціальна методика дозволила розділити міжпланетні та іоносферні мерехтіння, виявити їх дисперсійні залежності, зареєструвати багатопотокову структуру сонячного вітру. Вивчення Сонця і міжпланетного середовища, особливо на низьких частотах, надзвичайно важливе для вирішення проблем космічної погоди та її прогнозування.

На рис. 8 показано динамічні спектри випромінювання Сонця, виміряні одночасно на УТР-2 і ГУРТ. Видно, що незважаючи на порівняно невелику площу однієї субрешітки, спектри досить інформативні, а завдяки значно більшій смузі реєстрації вдалося задетектувати навіть другу гармоніку сонячного сплеску II типу.

Юніпер. Ще одним об'єктом, який унікальним чином генерує низькочастотне радіовипромінювання, є планета-гігант Юпітер. Разом з тим, незважаючи на 60-річну історію вивчення Юпітера на радіохвилях, детального пояснення цього явища немає і досі. Тому ці спостереження не втратили актуальності й сьогодні, особливо на таких інструментах, як УТР-2, УРАН, ГУРТ. Це добре ілюструє рис. 9, на якому показано динамічний спектр з відкриттям двох явищ — «зебра»-структури і сплесків поглинання.

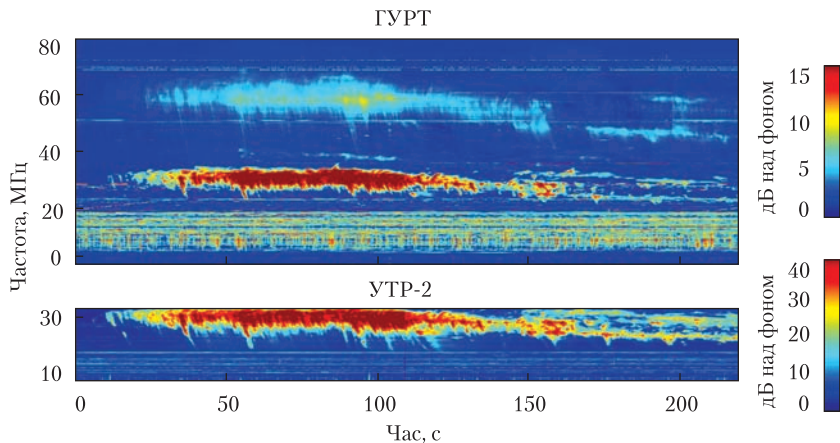


Рис. 8. Синхронне детектування сплесків II типу на радіотелескопах УТР-2 і ГУРТ

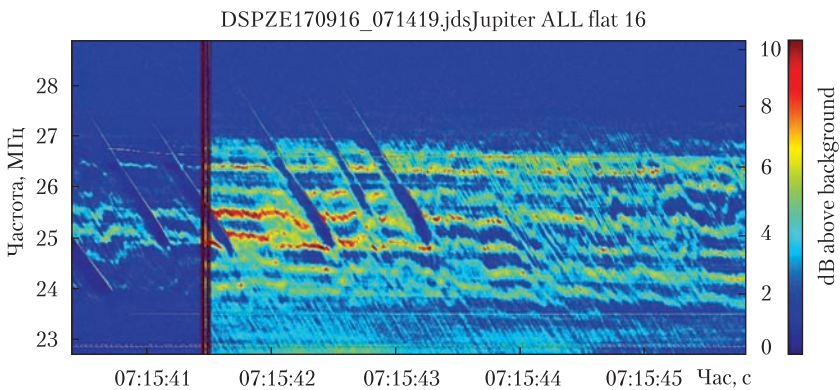


Рис. 9. Нові типи радіосплесків Юпітера, задетектовані у вересні 2016 р. під час координуваних спостережень на УТР-2 і космічній місії Juno

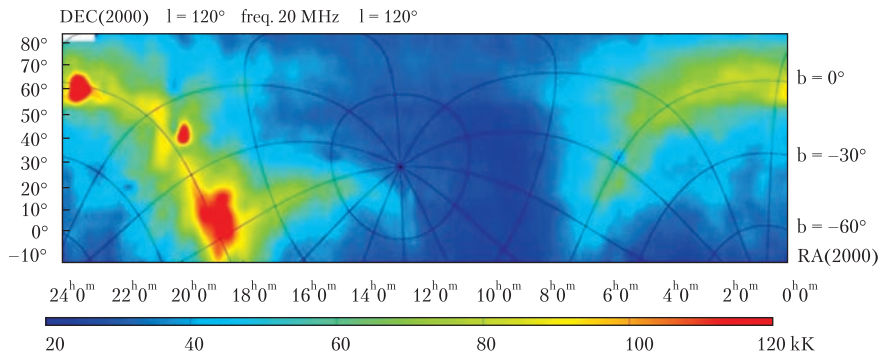


Рис. 10. Розподілення нетеплового радіовипромінювання Галактики, отримане комбінованим використанням УТР-2 і УРАН

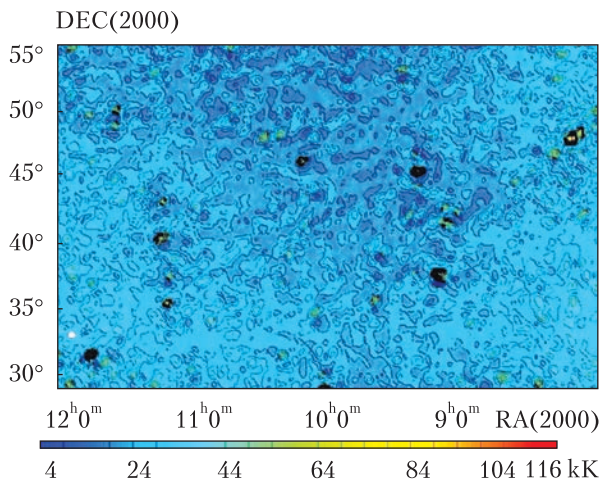


Рис. 11. Виявлення позагалактичних радіоджерел у ході системного огляду північного неба на УТР-2

В останні роки продовжувалися пошукові дослідження радіовипромінювання й інших планет — Сатурна, Урана, Венери. Поки що позитивних результатів не отримано. Важливість досліджень Юпітера, механізмів та енергетики його випромінювання пов'язана також з тим, що, як очікується, ця планета-гігант повинна мати своїх «двійників» — екзопланети поблизу інших зір. Відповідний пошук періодично здійснюється, зокрема й у міжнародних експериментах.

Міжзоряне середовище. Це середовище має безліч матеріальних субстанцій і речовин — багатокомпонентний міжзоряний газ, пил, магнітні поля, випромінювання різних діапазонів хвиль, космічні промені. Електронна компонента останніх унаслідок свого руху в магнітних полях Галактики створює нетеплове синхротронне радіовипромінювання. Найінтенсивніше воно на низьких частотах, а тому цікаве для досліджень. На рис. 10 наведено високочотну карту, побудовану на основі спостережень з комбінованим використанням УТР-2 і УРАН-2. Ця картина є тривимірною — дві координати та інтенсивність випромінювання (позначено кольором). Карта корисна для вивчення фізики Галактики і може бути еталоном для інших досліджень, пов'язаних з визначенням енергетичних параметрів.

Українські радіотелескопи дали також змогу зробити відкриття, відоме у дослідженнях міжзоряного простору, — спектральні лінії рекордно високозбуджених атомів вуглецю. Зараз максимальні зареєстровані атомні рівні досягають 1100. Крім того, в останні роки реалізовано одночасне спостереження в неперервній смузі частот до 300 спектральних ліній, що вражає підвищило чутливість вимірювань. Також у 2017 р. вдалося відкрити слабкі, але дуже інформативні лінії поглинання міжзоряного водню.

Дослідження Метагалактики. На рис. 11 показано карту ділянки неба, побудовану за допомогою УТР-2 з рекордною для декаметрових хвиль чутливістю і роздільною здатністю. Вона містить позагалактичні радіоджерела — радіогалактики і квазари. Інтерпретація даних полягає у вивченні кутових розмірів джерел, спектрів їх випромінювання, розподілу в просторі, порівнянні з даними інших діапазонів хвиль. Ця інформація є незамінною для вирішення багатьох астрофізичних і космологічних проблем.

Висновки

Уже більш як півстоліття Україна є світовим лідером у галузі низькочастотної радіоастрономії — одного з найактуальніших напрямів сучасної астрономічної науки. Це зумовлено тим, що ми маємо п'ять найбільших у світі радіотелескопів декаметрових хвиль УТР-2 і УРАН. На тлі бурхливого прогресу світової низькочастотної радіоастрономії українські інструменти залишаються незамінними і всебічно затребуваними міжнародною радіоастрономічною спільнотою.

Завдяки виконанню Цільової програми НАН України у 2014–2017 рр. було отримано велику кількість пріоритетних науково-технічних результатів і зроблено низку астрофізичних відкриттів, які вже широко визнані в науковому світі. Серед них — широкосмугове одночасне детектування величезної кількості (близько 300) рекомбінаційних ліній з рекордно високозбудженими станами міжзоряних

атомів вуглецю на рівнях, більших за 1100, і разом з тим відкриття слабких, але дуже інформативних ліній поглинання водню в Галактиці. Виявлено нові частотно-часові особливості в нетепловому радіовипромінюванні об'єктів сонячної системи і Галактики, відкрито велику кількість поки ще не ототожнених, але вже надійних радіоджерел спорадичного радіовипромінювання, які утворюють новий клас астрономічного населення Всесвіту.

За результатами виконання Цільової програми опубліковано близько 100 статей у провідних журналах світу, зроблено понад 80 доповідей на представницьких міжнародних конференціях, постійно зростає цитованість робіт українських радіоастрономів та інші наукометричні показники, активно розвивається міжнародне співробітництво.

У найближчі роки вкрай необхідним і доцільним є суттєве поліпшення параметрів радіотелескопів — чутливості, роздільної здатності, а також підвищення ефективності досліджень через впровадження додаткових елементів радіотелескопа нового покоління ГУРТ, сучасної надчутливої цифрової приймально-реєструвальної апаратури, інноваційних інформаційних технологій, заводостійких методів радіоастрономічних спостережень. Це забезпечить максимальну інтеграцію унікальної вітчизняної експериментальної бази до європейських і світових мереж багатоантенної і наземно-космічної радіоастрономії і дозволить отримати нові фундаментальні знання про Всесвіт, ви-



Президент НАН України Б.Є. Патон і академік НАН України С.Я. Брауде в обсерваторії УТР-2. Червень 1971 р.

рішити важливі прикладні проблеми, зокрема прогнозування космічної погоди.

Унікальне архівне фото президента НАН України Б.Є. Патона і академіка НАН України С.Я. Брауде було зроблено в червні 1971 р. під час виїзного засідання Бюро Президії АН УРСР в обсерваторії УТР-2. Фактично це була інавгурація нині всесвітньо відомого радіотелескопа, тобто офіційний початок його роботи, а отже, у 2021 р. ми відзначатимемо 50-річчя функціонування цього унікального інструмента. Для науки і в Україні, і в світі дуже важливо, щоб у цей час радіотелескоп обов'язково активно і плідно працював. Виконання нової цільової програми на 2018–2022 рр., безумовно, максимально цьому сприятиме.

REFERENCES

[СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ]

1. Konovalenko A., Sodin L., Zakharenko V. et al. The modern radio astronomy network in Ukraine: UTR-2, URAN and GURT. *Exp. Astron.* 2016. **42**(1): 11. <https://doi.org/10.1007/s10686-016-9498-x>
2. Zakharenko V., Konovalenko A., Zarka P. et al. Digital Receivers for Low-Frequency Radio Telescopes UTR-2, URAN, GURT. *J. Astron. Instrum.* 2016. **5**(4): 1641010. <https://doi.org/10.1142/S2251171716410105>
3. Konovalenko A.A., Yerin S.N., Bubnov I.N. et al. Astrophysical studies with small low-frequency radio telescopes of new generation. *Radio Phys. Radio Astron.* 2016. **21**(2): 83. <https://doi.org/10.15407/rpra21.02.083>
4. Tokarsky P.L., Konovalenko A.A., Yerin S.N. Sensitivity of an Active Antenna Array Element for the Low-Frequency Radio Telescope GURT. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2017. **65**(9): 4636. <https://doi.org/10.1109/TAP.2017.2730238>
5. Konovalenko A., Zarka P., Rucker H.O. et al. Multi-antenna observations in the low-frequency radio astronomy of solar system objects and related topics studies. In: Fischer G., Mann G., Panchenko M., Zarka P. (eds.). *Planetary Radio Emissions VIII*. (Austrian Academy of Sciences Press, Vienna, 2017). P. 467–478.

6. Imai M., Lecacheux A., Clarke T. et al. Beaming structures of Jupiter's decametric common S-bursts observed from LWA1, NDA, and URAN2 radio telescopes. *Astrophys. J.* 2016. **826**(2): 176. <https://doi.org/10.3847/0004-637X/826/2/176>
7. Konovalenko A.A. Progress in low-frequency radio astronomy and I.S. Shklovskii's contribution to its development. *Astron. Rep.* 2017. **61**(4): 317. <https://doi.org/10.1134/S1063772917040102>
8. Melnik V.N., Brazhenko A.I., Konovalenko A.A. et al. Unusual Solar Radio Burst Observed at Decameter Wavelengths. *Solar Phys.* 2014. **289**(1): 263. <https://doi.org/10.1007/s11207-013-0328-2>

A.A. Konovalenko

Institute of Radio Astronomy of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kharkiv)

THE DEVELOPMENT, CREATION AND IMPLEMENTATION OF THE WORLD LARGEST
UKRAINIAN LOW FREQUENCY RADIO ASTRONOMY ELEMENTS AND SYSTEMS
(about the results of the implementation of the target research program of the NAS of Ukraine
for 2014–2017)

According to the materials of scientific report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine, December 27, 2017

The implementation of target scientific complex program of NAS of Ukraine for 2014-2017 was very important and indispensable for the development of national and even worldwide low-frequency radio astronomy. Currently this science is rapidly progressing in the world, including the creation of new radio telescopes. But our country remains a world leader. Largest decameter wave radio telescopes UTR-2 and URAN not only fundamentally improved their means and methods of observation, but also significantly expanded their capabilities and operating frequency range with the creation of an additional antenna GURT of the new generation. It is proved that the implementation of coordinated multi-antenna observations in international studies using the most sensitive Ukrainian radio telescopes and foreign ground-based instruments as well as space missions allows obtaining a lot of priority results in the study of objects in the Universe.

Keywords: low frequency radio astronomy, radio telescope, multi-antenna observations, digital signal recording, Solar system, Galaxy, Metagalaxy.