

РАДІОАСТРОНОМІЯ І АСТРОФІЗИКА

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra26.01.005>

УДК 523.164

О. О. КОНОВАЛЕНКО¹, В. В. ЗАХАРЕНКО¹,
Л. М. ЛИТВИНЕНКО¹, О. М. УЛЬЯНОВ¹,
М. А. СИДОРЧУК¹, С. В. СТЬОПКІН¹, В. О. ШЕПЕЛЄВ¹,
Ф. ЗАРКА², Г. О. РУКЕР³, А. ЛЕКАШО²,
М. ПАНЧЕНКО³, Ю. М. БРУК¹, П. Л. ТОКАРСЬКИЙ¹,
І. М. БУБНОВ¹, С. М. ЄРІН¹, В. Л. КОЛЯДІН¹,
В. М. МЕЛЬНИК¹, М. М. КАЛІНІЧЕНКО^{1,4},
О. О. СТАНІСЛАВСЬКИЙ¹, В. В. ДОРОВСЬКИЙ¹,
О. Д. ХРИСТЕНКО¹, В. В. ШЕВЧЕНКО¹,
О. С. БЕЛОВ¹, А. О. ГРІДІН¹, О. В. АНТОНОВ¹,
В. П. БОВКУН¹, О. М. РЕЗНІЧЕНКО¹, В. М. БОРЦОВ¹,
Г. В. КВАСОВ¹, Л. М. ОСТАПЧЕНКО¹, М. В. ШЕВЧУК¹,
В. А. ШЕВЧЕНКО¹, Я. С. ЯЦКІВ⁵, І. Б. ВАВІЛОВА⁵,
І. С. БРАУДЕ¹, Ю. Г. ШКУРАТОВ^{8,1}, В. Б. РЯБОВ¹,
Г. І. ПІДГОРНИЙ¹, А. Г. ТИМОШЕВСЬКИЙ¹,
О. О. ЛИТВИНЕНКО¹, В. В. ГАЛАНІН¹, М. І. РЯБОВ¹,
А. І. БРАЖЕНКО⁶, Р. В. ВАЦИШИН⁶, А. В. ФРАНЦУЗЕНКО⁶,
В. В. КОШОВИЙ⁷, О. Л. ІВАНТИШИН⁷,
А. Б. ЛОЗІНСЬКИЙ⁷, Б. С. ХАРЧЕНКО⁷, Я. Ю. ВАСИЛЬЄВА¹,
І. П. КРАВЦОВ¹, Є. В. ВАСИЛЬКІВСЬКИЙ¹,
Г. В. ЛИТВИНЕНКО¹, Д. В. МУХА¹, Н. В. ВАСИЛЕНКО¹,
А. І. ШЕВЦОВА¹, А. П. МІРОШНІЧЕНКО¹, Н. В. КУГАЙ^{4,1},
Я. М. СОБОЛЄВ¹, Н. О. ЦВИК¹

¹ Радіоастрономічний інститут НАН України,
вул. Мистецтв, 4, м. Харків, 61002, Україна
E-mail: akonov@rian.kharkov.ua

² Лабораторія космічних досліджень і астрофізичного приладобудування,
Паризька обсерваторія, медонський філіал,
пл. Жюль Жансена, 5, Медон, F-92195, Франція

³ Інститут космічних досліджень Австрійської академії наук,
вул. Шмідльштрассе, 6, м. Грац, 8042, Австрія

⁴ Глухівський національний педагогічний університет ім. О. Довженка,
вул. Києво-Московська, 24, м. Глухів, 41400, Україна

⁵ Головна астрономічна обсерваторія НАН України,
вул. Академіка Заболотного, 27, м. Київ, 03143, Україна

⁶ Полтавська гравіметрична обсерваторія
Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України,
вул. М'ясоєдова, 27/29, м. Полтава, 36014, Україна

⁷ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України,
вул. Наукова, 5, м. Львів, 79060, Україна

⁸ Науково-дослідницький інститут астрономії
Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна,
вул. Сумська, 35, м. Харків, 61022, Україна

ЗАСНОВНИКУ ДЕКАМЕТРОВОЇ РАДІОАСТРОНОМІЇ В УКРАЇНІ АКАДЕМІКУ НАН УКРАЇНИ СЕМЕНУ ЯКОВИЧУ БРАУДЕ 110 РОКІВ: ІСТОРІЯ СТВОРЕННЯ ТА РОЗВИТКУ ВІТЧИЗНЯНОЇ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ БАЗИ ВПРОДОВЖ ОСТАННЬОГО ПІВСТОЛІТТЯ

Предмет і мета роботи: *Історичний огляд розвитку експериментальної бази низькочастотної радіоастрономії в Україні від її заснування півстоліття тому видатним вченим С. Я. Брауде до сучасного стану.*

Методи і методологія: *Використано результати постійного прогреса електронної, комп'ютерної і цифрової техніки, інформаційних і телекомунікаційних технологій, теорії і практики створення антенних та приймальних систем, впровадження яких збагатило апаратно-методологічну ідеологію побудови та використання радіотелескопів УТР-2, УРАН, ГУРТ. Результати: Створено нові та вдосконалено існуючі найефективніші в світі вітчизняні експериментальні засоби радіоастрономії декаметрових–метрових хвиль – радіотелескопи УТР-2, УРАН, ГУРТ. Забезпечено найкраще поєднання головних параметрів систем: чутливості; смуги частот; просторової, частотної та часової роздільних здатностей; завадостійкості; рівномірності амплітудно-частотної та просторово-частотної характеристик; багатофункціональності.*

Висновки: *Впродовж півстолітньої радіоастрономічної науково-технічної діяльності в Радіоастрономічному інституті НАН України доведено високу астрофізичну інформативність низькочастотної радіоастрономії та можливість створення високоєфективної експериментальної бази – гігантських радіотелескопів декаметрово-метрового діапазонів хвиль. Наразі українські радіотелескопи є добре відомими та визнаними в світі, незамінними і максимально затребуваними науковою спільнотою. Засновник декаметрової радіоастрономії в Україні видатний вчений Семен Якович Брауде не помилився, коли вирішив розпочати радіоастрономічні дослідження. Пам'ять про нього завжди лишатиметься в умах і серцях багатьох поколінь.*

Ключові слова: *низькочастотна радіоастрономія, радіотелескоп, фазообертач, антенний підсилювач, цифровий ресетратор сигналів, ефективна площа, чутливість, роздільна здатність, завадостійкість*

ЗМІСТ

1. Вступ
 2. Перші роки декаметрової радіоастрономії в Україні
 3. Створення Радіоастрономічного інституту НАН України
 4. Радіотелескопи УТР-2 і УРАН
 5. Радіотелескоп нового покоління ГУРТ
 6. Радіоастрономічна приймально-реєструюча апаратура
 7. Методи спостережень у низькочастотній радіоастрономії
 8. Міжнародна співпраця і роль України в розвитку низькочастотної радіоастрономії
 9. Висновки
- Список літератури

1. Вступ

Радіоастрономія є одним з найбухливіше прогресуючих напрямів фундаментальної науки, що збагатив знання людства про Всесвіт результатами і фактами першорядного значення. Радіоастрономічні дослідження охоплюють вели-

чезний діапазон електромагнітного космічного випромінювання – від кілометрових, гектометрових, декаметрових, метрових хвиль (низькочастотна радіоастрономія) до дециметрових, сантиметрових і міліметрових хвиль (високочастотні діапазони).

Важливо відзначити, що у сучасній всехвильовій астрономічній науці низькочастотна радіоастрономія, насамперед у декаметровому і метровому діапазонах (частоти $3 \div 30$ та $30 \div 300$ МГц), посідає особливе місце. Це зумовлене не тільки і не стільки тим, що радіоастрономія як наука народилась саме у декаметровому діапазоні хвиль на частоті близько 20 МГц 87 років тому завдяки американському радіоінженеру Карлу Янському. Більш важливим є те, що з початком систематичних радіоастрономічних досліджень на декаметрових хвилях відкрилося принципово нове “вікно” у Всесвіт, який виявився абсолютно не таким, яким його бачило людство протягом багатьох тисячоліть в оптичному, а потім і у високочастотних діапазонах. Поступово ставали зрозумілими фізичні причини наявності незвичайних і екзотичних астрофізичних об'єктів і явищ. Було з'ясовано,

що в радіоастрономії, особливо низькочастотній, значну перевагу мають багато типів так званих нетеплових механізмів радіовипромінювання. Нагадаємо, що декаметрове космічне радіовипромінювання є гранично низькочастотним для спостережень з поверхні Землі з причини екрануючого впливу земної іоносфери.

Одним з перших, хто оцінив високу астрофізичну значущість радіоастрономії декаметрових хвиль, був видатний вчений академік НАН України Семен Якович Брауде (1911–2003). У 2021 р. відзначатиметься 110 річниця від дня його народження (рис. 1). Під керівництвом Семена Яковича в 60-х роках минулого століття почала створюватися високоефективна експериментальна база радіоастрономічних досліджень. При цьому максимально враховувались специфічні вимоги до техніки і методів спостережень за умов багатьох негативних факторів, притаманних саме гранично низькочастотним дослідженням. В результаті півстоліття тому під Харковом був побудований унікальний гігантський радіотелескоп УТР-2 [1]. Саме у 2021 р. виповнюється 50 років з дня інавгурації цього наразі всесвітньо відомого інструмента. Дещо пізніше у різних місцях України на відстанях до 1000 км (розподілених з півдня на північ і з заходу на схід) була побудована серія радіотелескопів УРАН-1, ..., УРАН-4. Це знаменувало створення першої в світі наднизькочастотної мережі радіоінтерферометрів з наддовгими базами (РНДБ). Не можна не згадати з вдячністю постійну підтримку, починаючи з 60-х років, керівництва Національної академії наук України і особисто її Президента Бориса Євгеновича Патона. У 2018 р. цій видатній людині виповнилося 100 років, що співпало зі 100-річним ювілеєм головного наукового відомства України – Національної академії наук. Отже, останнє триріччя, 2018–2021 рр., знаменується славетними ювілеями у житті вітчизняної радіоастрономічної науки.

Представлений нижче короткий огляд присвячений історії виникнення та розвитку радіоастрономії в Україні й насамперед унікальної вітчизняної експериментальної бази, починаючи від згаданих вище перших історичних кроків до сучасних засобів і методів низькочастотної радіоастрономії.

Під час підготовки огляду 19 серпня 2020 р. Бориса Євгеновича Патона не стало. Пам'ять

про цього видатного вченого, організатора науки, чудову людину навіки залишиться в умах та серцях всього людства.

2. Перші роки декаметрової радіоастрономії в Україні

Слід згадати, що С. Я. Брауде звернув увагу на радіоастрономію як цікаву науку ще в середині 1950-х рр., практично залишивши інші напрями своєї багатогранної діяльності [2]. Наприкінці 50-х років на відстані 70 км на південний схід від Харкова у сухому степовому районі була організована радіоастрономічна обсерваторія із чималою площею, близько 140 га. Саме тут вперше в Україні почала створюватися нова експериментальна база для низькочастотної (декаметрової) радіоастрономії діапазону 10 ÷ 25 МГц [3–5]. Спочатку то були відносно невеликі 24-елементні антени-решітки ІД-1, ІД-2 (рис. 2). Головною метою було з'ясування принципів побудови фазованих решіток з електронним керуванням променем, широким діапазоном частот, високими чутливістю та завадостійкістю. Дещо пізніше були побудовані тестові двохантений короткобазовий інтерферометр 2×128 елементів (рис. 3) та радіотелескоп УТР-1 (рис. 4). Ці радіотелескопи вже мали значні розміри і дозволили розпочати важливі дослідження.

До середини 60-х років стала зрозумілою правильність вибору технічних рішень і концепцій, що дозволило розпочати створення гігантського (найбільшого в світі) високоефективного радіотелескопа декаметрових хвиль. Колектив наукових працівників, інженерів, техніків Інституту радіофізики та електроніки (ІРЕ) АН УРСР на чолі із С. Я. Брауде з ентузіазмом та натхненням взявся за цю складну і відповідальну справу. В результаті у 1971 р. було побудовано і офіційно введено в дію радіотелескоп УТР-2 (Український Т-подібний Радіотелескоп, друга модель). На рис. 5 показано історичне фото, зроблене під час виїзного засідання Бюро Президії АН УРСР на чолі з Президентом АН УРСР Борисом Євгеновичем Патоном 4 червня 1971 р., присвяченого інавгурації радіотелескопа УТР-2 в радіоастрономічній обсерваторії (зараз вона має ім'я С. Я. Брауде). Ця подія відкрила нову сторінку у розвитку вітчизняної та світової радіоастрономічної науки.

У архівах Президії НАН України була знайдена Постанова Президії АН УРСР від 28 листопада 1971 р., присвячена цьому фактові (копія Постанови надається нижче). Цікаво проаналізувати задачі, сформульовані у цьо-

му історичному документі тих далеких років, порівняно із сучасним станом радіоастрономічної техніки і досліджень. Представлений огляд значною мірою присвячений цьому аналізу.

КОПІЯ

ПРЕЗИДІЯ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНСЬКОЇ РСР

ПОСТАНОВА № 348

28 листопада 1971 р.

Про дослідження з радіоастрономії в
Інституті радіофізики і електроніки
АН УРСР /наукова доповідь/

Заслухавши та обговоривши наукову доповідь академіка АН УРСР С.Я. Брауде про дослідження з радіоастрономії та перспективи їх розвитку в Інституті радіофізики і електроніки АН УРСР Президія Академії наук УРСР відмічає, що вчені інституту досягли значних успіхів у наукових дослідженнях з радіоастрономії, а також у радіоастрономічних апаратурних роботах.

Так, протягом 1960–1970 рр. в інституті за допомогою радіотелескопа УТР-1 було складено каталог декаметрових спектрів близько 250 дискретних джерел, причому були встановлені нові закономірності в побудові цих спектрів. Вказаний каталог здобув світове визнання.

В інституті вперше одержано важливі результати по дослідженню розподіленого галактичного радіовипромінювання в декаметровому діапазоні хвиль. Дальші дослідження в цьому напрямі матимуть вирішальне значення в з'ясуванні питання про існування і форму галактичної радіокорони.

Успішно проводяться теоретичні радіоастрономічні дослідження, пов'язані з інтерпретацією результатів вимірювання частотних спектрів дискретних джерел, розповсюдженням радіохвиль в неізотропній міжпланетній плазмі, розробкою теорії радіолокаційних вимірювань ефективного перерізу розсіювання Сонця та ряд інших.

Найважливішим досягненням діяльності інституту в галузі радіоастрономії за останні роки є завершення і пуск в експлуатацію декаметрового радіотелескопа УТР-2, який є найкрупнішим в світі і унікальним за параметрами. Спорудження цього радіотелескопа є крупним досягненням вітчизняної радіоастрономії, що відкриває великі можливості у дослідженні космічних об'єктів.

Поряд з цим Президія Академії наук УРСР вважає, що для введення радіотелескопа УТР-2 в режим оптимальної експлуатації інститут повинен виконати значний обсяг методичних досліджень, зокрема в напрямках автоматизації обробки результатів радіоастрономічних вимірювань і обліку впливу електронної концентрації і іоносферної рефракції радіохвиль на результати вимірювань неізотропності іоносфери. Слід також визнати, що наукові зв'язки інституту з іншими радіоастрономічними центрами в СРСР і за його межами ще недостатні. Недостатня також кількість комплексних досліджень в радіоастрономії з іншими установами СРСР.

Президія Академії наук УРСР постановляє:

1. Схвалити наукову доповідь академіка АН УРСР С.Я. Брауде.

2. Схвалити діяльність Інституту радіофізики і електроніки АН УРСР в галузі радіоастрономії.
3. Вважати головними напрямками радіоастрономічних досліджень в Інституті радіофізики і електроніки АН УРСР у 1971-1975 рр.:
 - автоматизацією наукового експерименту в галузі радіоастрономії;
 - створення статистично повного огляду радіоджерел північної півкулі в діапазоні 10-25 МГц;
 - вимірювання у північній півкулі з високою роздільною здатністю розподіленого космічного випромінювання в діапазоні 10-25 МГц;
 - експериментальне та теоретичне дослідження радіовипромінювання Сонця в декаметровому діапазоні;
 - вивчення міжпланетного середовища та сонячного вітру шляхом спостереження поширення в ньому радіохвиль від дискретних джерел космічного радіовипромінювання;
 - вимірювання кутових розмірів та розподілу радіояскравості дискретних джерел космічного радіовипромінювання.
4. Доручити Інституту радіофізики і електроніки АН УРСР:
 - протягом IV кварталу 1971 р. розробити план заходів щодо встановлення більш тісних зв'язків з іншими радіоастрономічними центрами СРСР і країн соціалістичного табору з метою організації спільних комплексних досліджень на радіотелескопі УТР-2 з використанням спеціальної апаратури цих центрів;
 - протягом півріччя вивчити питання про можливість використання радіотелескопа УТР-2 для проведення досліджень в галузі фізики іоносферного розповсюдження радіохвиль радіоастрономічними методами і свої пропозиції подати до Відділення фізики АН УРСР;
 - протягом 1972 р. розробити план розгортання системи спостережень із залученням радіоастрономічних центрів у м. Горькому і Середньої Азії;
 - протягом I кв. 1972 р. розробити і погодити у встановленому порядку пропозиції про надання радіотелескопу УТР-2 міжвідомчого статусу;
 - протягом трьох років завершити роботу по складанню Атласу дискретних радіоджерел, доручити керівництво цією роботою академіку АН УРСР С.Я. Брауде;
 - до 1 січня 1972 р. подати до Президії АН УРСР пропозиції щодо створення при ІРЕ АН УРСР конструкторського бюро на госпрозрахункових засадах;
 - до 1 січня 1972 р. подати до Президії АН УРСР конкретний план робіт по практичному використанню досліджень в галузі радіоастрономії, зокрема з антенних робіт.
5. Погодитися з пропозицією Інституту радіофізики та електроніки АН УРСР щодо необхідності оснащення радіотелескопа УТР-2 засобами автоматизації наукових досліджень.
6. Питання про матеріально-технічне забезпечення досліджень в галузі радіоастрономії винести на розгляд Бюро Президії АН УРСР в I кв. 1972 р.
7. Відділенням фізики та наук про Землю і Космос АН УРСР у двотижневий строк підготувати пропозиції щодо розвитку, починаючи з 1972 р., комплексних досліджень на базі досягнень ІРЕ АН УРСР в галузі радіоастрономії, маючи на увазі залучити до цієї роботи Одеську обсерваторію і ФТІНТ АН УРСР.

8. Організацію виконання цієї постанови покласти на Відділення фізики АН УРСР.

Президент Академії наук УРСР
Академік

Б. Є. Патон

В.о. головного вченого секретаря
Президії Академії наук УРСР
доктор технічних наук

І. К. Походня

Своєрідний звіт про виконання завдань цієї Постанови протягом перших 5 років мав місце під час Всесоюзної радіоастрономічної конференції у Харкові восени 1976 р. (рис. 6). Харківські радіоастрономи представили понад 10 наукових доповідей, які отримали найвищі оцінки авторитетних фахівців. Було визнано, що декаметрова радіоастрономія, створена в Україні, є новим науковим напрямом, який має найкращі перспективи розвитку.

Відразу після створення радіотелескоп УТР-2 почав активно працювати і надавати нову астрофізичну інформацію. В 70-ті роки головним завданням було складання унікального, першого на декаметрових хвилях високоточного каталогу позагалактичних радіоджерел [6]. Були зареєстровані декілька сотень радіогалактик і квазарів, серед яких до 5 відсотків виявилися невідомими раніше, визначені їх координати, побудовані широкосмугові спектри випромінювання в діапазоні $10 \div 25$ МГц. Хоча радіотелескоп був створений саме для пошуку і досліджень дискретних (точкових) радіоджерел (протяжні об'єкти відфільтровувалися автоматично вже на етапі спостережень), вдалося розпочати успішні дослідження галактичного фону [7], емісійних туманностей та залишків наднових [8], корони Сонця [9]. Незважаючи на досить просту на той час реєструючу апаратуру, було задетектовано навіть декаметрове імпульсне радіовипромінювання пульсарів [10] (всього через кілька років після їх відкриття в Англії на високих частотах у 1967 р., за що була присуджена Нобелівська премія).

На жаль, на теперішній час жодного з засновників низькочастотної радіоастрономії, тих видатних науковців, що працювали до 1971 р., нема серед нас, живих. Однак справа, яку започаткували С. Я. Брауде та інші першопрохідці, живе і

активно розвивається впродовж останніх п'ятдесяти років. Поступово стали зрозумілими недоліки, які були пов'язані з рівнем науки і техніки тих далеких часів, в апаратно-методичній сфері, хоча і зараз суто антенні аспекти УТР-2 вражають досконалістю ідейних підходів [11–13]. Перші радіотелескопи і відповідна приймально-реєструюча апаратура створювались на принципах, що існували в 50–60-х роках, використовувались вакуумні електронні прилади, проста аналогова апаратура, чорнильні самописці та стрілочні індикатори для відображення інформації, арифмометри і логарифмічні лінійки для обробки даних.

Нове покоління радіоінженерів, радіофізиків, фізиків – випускників харківських ВНЗ, вже добре знало і розуміло напівпровідникову та мікросхемотехніку, цифрову реєстрацію, обробку сигналів, комп'ютери, програмування, методи сучасної теоретичної й експериментальної фізики. Слід відзначити оптимальну з огляду на потреби радіоастрономії програму підготовки фахівців у 1960–1980-х рр. на радіотехнічному факультеті Харківського інституту радіоелектроніки.

З початку 70-х років почала збагачуватись апаратно-методологічна ідеологія УТР-2, що на протязі останніх десятиліть дозволило суттєво покращити параметри експериментів та отримати безліч пріоритетних науково-технічних результатів, які стали добре відомими, визнаними і затребуваними світовою радіоастрономічною спільнотою.

У наступних розділах огляду більш детально буде описане створення нового Радіоастрономічного інституту в Академії наук України і те, як відбувалося поступове вдосконалення експериментальної бази (антен, приймально-реєструючих засобів, методів спостережень) вітчизняної низькочастотної радіоастрономії впродовж останнього півстоліття.

3. Створення Радіоастрономічного інституту в Академії наук України

Отже, протягом майже 10 років після інавгурації УТР-2, створеного в ІРЕ АН УРСР, вітчизняна низькочастотна радіоастрономія поступово завоювала передові позиції в світі. Почалися всебічна модернізація і вдосконалення експериментальної бази, включно з впровадженням нової аналогової і цифрової апаратури, комп'ютеризацією досліджень, впровадженням нових спостережних програм. Виявилось виправданим створення радіотелескопа УРАН-1 біля міста Зміїв, вперше в світі за його допомогою було показало хороші перспективи РНДБ у наднизькочастотній радіоастрономії. Відповідна діяльність була схвалена керівництвом Академії, а також закордонними експертами. У 1977 р. присуджено Державну премію СРСР за створення УТР-2. На той час у Відділенні радіоастрономії ІРЕ під керівництвом академіка С. Я. Брауде працювало близько 70 співробітників у Відділі декаметрової радіоастрономії, Відділі радіотелескопів і інтерферометрів, Радіоастрономічної обсерваторії.

Разом з тим у розвитку цього актуального і потужного напрямку в ІРЕ почали відчуватись деякі обмеження. У цій знаній науковій установі з кількістю співробітників понад 500 (у нещодавно створеному СКТБ було понад 100 працівників) радіоастрономічна діяльність дещо не вписувалася. Суттєва різниця полягала, зокрема, у наявності величезної віддаленої обсерваторії з цілодобовим функціонуванням у польових умовах, що накладало додаткову відповідальність. Науково-організаційна діяльність Інституту радіофізики та електроніки була сильно орієнтована на потреби ВПК, що було не дуже суміс-

ним з чисто фундаментальною діяльністю, пов'язаною з величезним обсягом інструментальних і експериментальних експедиційних робіт. Особливо це проявилось з необхідністю створення ще декількох радіотелескопів з відповідними обсерваторіями. Багато вітчизняних та закордонних фахівців зазначали, що науковий доробок, потенціал та перспективи радіоастрономічних підрозділів скоріше відповідають діяльності незалежної установи, як, наприклад, Радіоастрономічна обсерваторія Академії наук. Зважаючи на ще деякі суб'єктивні обставини, Семен Якович замислився над створенням такої установи. Першим кроком він запропонував очолити цю установу заступнику директора ІРЕ д. ф.-м. н. Л. М. Литвиненку. Леонід Миколайович погодився, але рекомендував створити не обсерваторію, а Радіоастрономічний інститут. Ця пропозиція була повністю підтримана академіком Б. Є. Патоном і керівником астрономічних досліджень в Україні академіком Я. С. Яцківим.

Спочатку у 1980 р. в ІРЕ було створене Відділення радіоастрономії, куди, окрім радіоастрономічних відділів, для розширення сфери діяльності залучилися відділи, які вивчали іоносферу, виконували дослідження з розвитку теорії і техніки створення радіотелескопів. Це відділення, маючи близько 200 співробітників, почало працювати фактично як незалежна наукова установа.

Шлях до головної мети – створення нового Радіоастрономічного інституту в Академії наук – був непростим [2]. Як завжди, величезну позитивну роль зіграв Президент Академії Б. Є. Патон (рис. 7). В результаті у 1985 р. був створений Радіоастрономічний інститут АН УРСР (копії Розпорядження Ради Міністрів УРСР та Постанови Президії АН УРСР стосовно цієї події додаються).

КОПІЯ

РАДА МІНІСТРІВ УКРАЇНСЬКОЇ РСР

РОЗПОРЯДЖЕННЯ

від 18 листопада 1985 р. № 660-р

Київ

1. Відповідно до розпорядження Ради Міністрів СРСР від 9 листопада 1985 р. № 2339 створити у м. Харкові Радіоастрономічний інститут Академії наук УРСР

на базі Відділення радіоастрономії Інституту радіофізики і електроніки цієї Академії.

Створення зазначеного інституту здійснити в межах планів, лімітів та нормативів, установлених в Академії наук УРСР науково-дослідні роботи.

2. Визначити такі основні напрями роботи Радіоастрономічного інституту Академії наук УРСР:

- радіоастрономічні дослідження в декаметровому й міліметровому діапазонах хвиль та створення відповідних приладів і апаратури;
- дослідження іоносфери і міжпланетного середовища радіоастрономічними методами;
- розробка теорії та фізичних принципів створення радіотелескопів.

Академії наук УРСР уточнити у зв'язку з цим напрями наукової діяльності Інституту радіофізики і електроніки, внести необхідні зміни до його планів науково-дослідних робіт.

3. Покласти на Радіоастрономічний інститут Академії наук УРСР функції головного інституту в республіці в галузі радіоастрономічних досліджень.

4. Академії наук УРСР:

- створити експериментальне виробництво Радіоастрономічного інституту на базі частини госпрозрахункових підрозділів Інституту радіофізики і електроніки, а також з урахуванням стану та перспектив розвитку фундаментальних і прикладних досліджень в галузі радіоастрономії, розподілити будівлі, виробничі площі, обладнання і фінансові кошти Інституту радіофізики і електроніки між ним та Радіоастрономічним інститутом;
- у місячний строк затвердити структуру і плани науково-дослідних робіт Радіоастрономічного інституту відповідно до основних напрямів його діяльності;
- протягом 1986 року вирішити питання, пов'язані із створенням радіоастрономічного полігону в Київській області.

Голова
Ради Міністрів УРСР

О. Ляшко

Інд. 25

КОПІЯ

ПРЕЗИДІЯ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНСЬКОЇ РСР
ПОСТАНОВА № 437

29 листопада 1985 р.
м. Київ

Про створення у м. Харкові
Радіоастрономічного інституту
АН УРСР

На виконання розпорядження Ради Міністрів УРСР від 18 листопада 1985 р. № 660-р Президія АН УРСР постановляє:

1. Створити у м. Харкові Радіоастрономічний інститут /РІ/ АН УРСР на базі Відділення радіоастрономії Інституту радіофізики і електроніки /ІРЕ/ АН УРСР та Експериментальне виробництво РІ АН УРСР на базі частини госпрозрахункових підрозділів ІРЕ АН СРСР.

Створення зазначеного інституту здійснити в межах фонду заробітної плати і загальних асигнувань установлених ІРЕ АН УРСР.

2. Покласти на РІ АН УРСР проведення досліджень з таких основних напрямів:

радіоастрономічні дослідження в декаметровому й міліметровому діапазонах хвиль та створення відповідних приладів і апаратури;

дослідження іоносфери і міжпланетного середовища радіоастрономічними методами;

розробка теорії та фізичних принципів створення радіотелескопів.

3. Взяти до відома, що зазначеним розпорядженням Рада Міністрів УРСР поклала на РІ АН УРСР функції головного інституту в республіці в галузі радіоастрономічних досліджень.

4. Ввести РІ АН УРСР до складу Відділення фізики і астрономії АН УРСР.

5. Призначити члена-кореспондента АН УРСР Л. М. Литвиненка виконуючим обов'язки директора РІ АН УРСР з наступним обранням на цю посаду, звільнивши від обов'язків заступника директора ІРЕ АН УРСР та залишивши його завідувачим відділом прикладної електродинаміки РІ АН УРСР.

6. Зобов'язати в.о. директора РІ АН УРСР чл.-кор. АН УРСР Л. М. Литвиненка:

6.1. В місячний строк подати в установленому порядку на затвердження Президії АН УРСР склад дирекції інституту;

6.2. До 01.01.86 внести відповідні зміни до тематичних карток і подати їх у Відділення фізики і астрономії АН УРСР;

6.3. В I кв. 1986 р. підготувати необхідні матеріали щодо створення радіоастрономічного полігону в Київській області.

7. Затвердити структуру РІ АН УРСР згідно з додатком.

8. Створити Київське відділення радіоінтерферометричних досліджень РІ АН УРСР на базі відділу космічної фізики і Одеського відділу Головної астрономічної обсерваторії /ГАО/ АН УРСР, ліквідувавши вказані підрозділи в ГАО АН УРСР.

Покласти на створене відділення:

- розробку методів обробки радіоінтерферометричної інформації з урахуванням радіофізичних особливостей навколосемного простору;
- організаційне забезпечення створення радіотелескопа УРАН-5 і центрального пункту збору та обробки радіоінтерферометричної інформації.

9. Відділенню фізики і астрономії АН УРСР разом з Науково організаційним відділом та іншими підрозділами апарату Президії АН УРСР:

9.1. В установленому порядку до 01.01.86 вирішити, з урахуванням перспектив розвитку фундаментальних і прикладних досліджень у галузі радіоастрономії, питання розподілу будівель, виробничих площ, обладнання і фінансових коштів ІРЕ

між ним і РІ АН УРСР, у тому числі планів з праці апарату управління та граничних асигнувань на його утримання;

9.2. До 01.02.86 вирішити організаційні питання про створення Експериментального виробництва РІ АН УРСР на базі частини Дослідного виробництва СКТВ ІРЕ АН УРСР, яка розташована по вул. Гуданова, 2, з виробничими площами /близько 600 м²/, обладнанням і чисельністю співробітників /95-100 одиниць/, що там працюють, з відповідним фондом заробітної плати, та Одеської ділянки дослідного виробництва ГАО АН УРСР.

9.3. До 01.01.86 вирішити організаційні питання створеного Київського відділення радіоінтерферометричних досліджень РІ АН УРСР.

9.4. В місячний строк уточнити напрями наукової діяльності ІРЕ АН УРСР, подати їх на затвердження Президії АН УРСР та внести необхідні зміни до його планів науково-дослідних робіт.

10. Управлінню капітального будівництва АН УРСР разом з РІ АН УРСР провести необхідну підготовчу роботу щодо проектування виробничих споруд інституту у 1986 р., маючи на увазі розпочати будівництво у XII п'ятирічці.

Президент Академії наук УРСР
академік

Б. Є. Патон

Головний учений секретар
Президії АН УРСР
член-кореспондент АН УРСР

В. Ю. Тонкаль

Отже, Радіоастрономічний інститут НАН України існує вже 35 років [14], і описана нижче науково-технічна діяльність відбулася головним чином саме у цій установі.

4. Радіотелескопи УТР-2 і УРАН

Добре відомо, що успіх експериментальних досліджень залежить від якості та ефективності наукової установки. Одними з найяскравіших подібних прикладів є створення і використання грандіозних коштовних наукових приладів, які не мають аналогів у інших видах людської діяльності, – антенних систем сучасних радіотелескопів. Повною мірою до них належать велетенські, найбільші в світі українські радіотелескопи.

Радіотелескоп УТР-2 [15, 16], (рис. 8, 9), будувався понад 50 років тому. Цей унікальний найбільший в світі інструмент, створений великим колективом харківських учених, інженерів, техніків, і досі відрізняється досконалістю та глибиною науково-технічних ідей, закладених у конструкцію його антенної системи.

Головними особливостями і параметрами радіотелескопа УТР-2, що перевершують відповід-

ні параметри усіх відомих закордонних аналогів, були і залишаються такими:

- великі лінійні розміри (2 км × 1 км) та ефективна площа (150000 м²);
- висока кутова роздільна здатність (ширина діаграми 25');
- велика кількість антенних елементів (2040);
- широкий діапазон частот (8 ÷ 33 МГц);
- електронне керування променем у широкому секторі ($\pm 70^\circ$ від зеніту);
- п'ятипроменева розділена діаграма спрямованості, широке поле зору ($2^\circ \div 0.5^\circ$);
- забезпечення погодження чутливості і роздільної здатності, оптимальні конфігурація і заповнення UV-площини;
- широкосмугова недисперсійна система фазування (положення променя не залежить від частоти, кількість положень у небі – 2 млн) ліній передачі, засобів розділення і сумування сигналів, якісне погодження імпедансів елементів і систем з урахуванням параметрів ґрунту і взаємовпливу диполів;
- блискавкозахист антенних елементів;
- розвинена система напівавтоматичного конт-

ролю усіх елементів, ремонтпридатність, економічність та екологічна безпека.

Усі вказані позитивні особливості були впроваджені, підтверджені і удосконалені впродовж багаторічної експлуатації та модернізації УТР-2 [17].

Однією з головних систем у великій фазованій антенній решітці з довжиною ліній передачі та затримки у фазообертачах до десятків кілометрів, що призводить до багаторазового ослаблення сигналу, є система розподіленого антенного підсилення. Вона має забезпечити максимально широкий неперервний діапазон частот (не менший за діапазон власне антени), компенсувати втрати в лініях передачі та фазообертачах, реалізувати максимальну чутливість (антена температура галактичного фону повинна перевищувати шумову температуру підсилювачів приблизно на 10 дБ), гарантувати максимальний динамічний діапазон, завадостійкість, відсутність інтермодуляційних (нелінійних) завад. Система підсилення УТР-2, що існувала до 1980 р. [18] (рис. 10), не забезпечувала повною мірою жодної з вищезначених вимог. Найочевиднішим був недолік у використанні частотної смуги антени. Якщо ширина останньої близько 30 МГц, то у старій системі підсилювання використовувалось лише близько 20 % від цього значення (малося 6 окремих рознесених смуг шириною 1 МГц кожна). Крім того, на початку 70-х років з метою економії було встановлено всього два яруси розподіленого підсилення. При цьому перший (вхідний) ярус був встановлений досить далеко від входу власне антени, що давало дуже великі втрати сигналу (близько 20 дБ) на вході підсилювачів першого ярусу. Відповідний рівень сигналу антени відносно власного шуму складав лише 10 %, що еквівалентно зменшенню ефективної площі антени і чутливості у 10(!) разів.

Однак у 80-х роках була запропонована принципово нова ідеологія побудови системи антенного підсилення для унікальної антенної системи УТР-2 [19–22], що виявилася справедливою та адекватною і для інших низькочастотних широкосмугових антен-решіток. Ідея полягає у створенні багатоярусної багатокаскадної багатосмугової (з неперервним діапазоном частот) системи з максимізацією і оптимізацією чутливості, смуги частот, підсилення, динамічного діапазону, завадостійкості, погодженням імпедансів та стійкістю роботи.

Головна підсилювальна комірка побудована на основі двотактної схеми з загальною базою з автотрансформаторним негативним безшумним зворотним зв'язком, коефіцієнтом підсилення 7 дБ, шум-фактором від 2 до 4 (що залежить від колекторного струму у потужних біполярних транзисторах нового покоління КТ 939А). Неперервний діапазон синтезується з трьох смуг $8 \div 12$, $12 \div 18$, $18 \div 40$ МГц, що повністю погоджується зі смугою УТР-2. Фільтрація і сумування смуг забезпечується спрямованими фільтрами нового типу, які дають цілковите узгодження у смузі частот телескопа та максимальну стійкість роботи. Усі подальші розподілення чотирма ярусами та оптимальне підсилення у кожних смузі і ярусі забезпечуються завдяки комбінаціям необхідної кількості комірок та фільтрових схем, якість з'єднання яких є інваріантною до кожної структури.

Під час розробки і виготовлення підсилювальних комірок та фільтрів було виконано великий обсяг теоретичних і експериментальних досліджень, спрямованих на підвищення чутливості та лінеаризації підсилювачів, їх імпедансного узгодження та стійкості до самозбудження, розширення діапазону частот, спрощення масового виготовлення та налаштування. У процесі створення нової системи підсилювання було розроблено, виготовлено, налагоджено і впроваджено декілька тисяч підсилювачів і фільтрувальних схем (рис. 11, 12). Тридцятирічний досвід їхньої експлуатації повністю підтвердив правильність відповідних науково-технічних ідей і підходів, що у багато разів підвищили якість, надійність та ефективність роботи УТР-2. Дотепер створені системи перевищують закордонні аналоги за усіма головними параметрами.

Впродовж останніх 40 років практично всі інші системи антени УТР-2 також були значно вдосконалені. Наприклад, досить розвинена система контролю не виявляла деякі дефекти у антені. До них відносяться так звані “напівпробі” у сотнях комутаційних діодів та “напівпровідникові” ефекти у тисячах контактів герметичних реле. Навіть один подібний дефект цілковито руйнував роботу гігантського радіотелескопа через дуже інтенсивні інтермодуляційні завади. Було запропоновано додаткову методику і техніку виявлення цих дефектів та їх місця розташування радіоастрономічними вимірюваннями. Крім того, у найвідповідальніших місцях комутації сигналів

(коробках контролю) напівпровідникові діоди та схеми керування були замінені на сучасні герконові реле [23]. Це також додатково підвищило чутливість вимірювань. Близько 40 років тому були розширені функціональні можливості антени УТР-2, зокрема, можливість комп'ютерного керування діаграмами спрямованості, включно з незалежним керуванням антенами Схід–Захід та Північ–Південь. Це дозволило проводити спостереження за двома програмами одночасно (рис. 13). В усіх випадках є можливість використовувати п'ять променів антени Північ–Південь.

Мовлячи про розвиток та вдосконалення описаної радіоастрономічної антенної техніки, треба згадати не завжди помітний, але вкрай важливий вид технічної діяльності. Мається на увазі постійне та своєчасне компетентне обслуговування, оновлення та ремонт відповідних систем та елементів радіотелескопа. Справа в тому, що ці інструменти взагалі належать до найскладніших наукових установок, які мають величезну кількість однотипних та різнотипних складових частин. Так, загальна кількість антенних елементів УТР-2 складає 2040 шт., а вага кожного досягає 1 т. Значна частина обладнання радіотелескопа знаходиться у підземних колекторах довжиною 3 км (рис. 14, 15), що накладає додаткову відповідальність у їх обслуговуванні. Довжина фазуючих та магістральних радіочастотних коаксіальних кабелів дорівнює 120000 м, довжина ланцюгів управління, контролю та живлення більша у декілька разів. Важливими елементами є також численні високочастотні та низькочастотні роз'єми, що приєднуються до усіх кінців кабелів та дротів. Кількість фазообертачів усіх типів становить 450 шт., а комутаційних вакуумних реле типу РЕС-8 у їх складі – близько 2500. При цьому загальна кількість резисторів, конденсаторів, дроселів, напівпровідникових діодів та транзисторів перевищує 10000 шт. Тому майже щоденно відбувається контроль і калібрування систем, спеціальні прилади дозволяють робити це досить оперативно (рис. 16), обслуговування та заміна несправних елементів. Це відноситься власне до антенних елементів (фарбування, ремонт металоконструкцій та фундаментів), повної заміни симетруючих та погоджуючих схем у центрах диполів. Здійснюється регулярне очищення кабелів та роз'ємів, а також періодична їх заміна. Особливо відповідальним є обслуго-

вування фазообертачів, від так званих “малих” типу ФВ 6-4 (рис. 17) до найбільших ФВ 8-11, ФВ 4-10, ФВ 2-10 (рис. 18). Згадані вище коробки контролю, кількість яких перевищує 100 шт., також потребують регулярної профілактики. В результаті вказані роботи, а також гнучка конфігурація радіотелескопа забезпечують практично безперервну цілодобову роботу радіотелескопа, а кількість часу на профілактику і ремонт не перевищує декількох відсотків від загального часу функціонування інструмента.

З метою підвищення кутової роздільної здатності досліджень на декаметрових хвилях протягом 70–80-х років на основі УТР-2 була створена унікальна система декаметрових інтерферометрів УРАН – Український Радіоінтерферометр Академії Наук [24]. Окрім УТР-2, до неї входять ще чотири радіотелескопи дещо менших розмірів (рис. 19). Радіотелескопи УТР-2, УРАН-1 та УРАН-4 належать РІ НАН України, УРАН-2 – Полтавській гравіметричній обсерваторії Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України, УРАН-3 – львівському Фізико-механічному інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України. Система створює бази від 40 до 950 км, що дає кутове розділення близько декількох кутових секунд (це відповідає фундаментальному обмеженню, зумовленому розсіянням у міжзоряному середовищі). Розміщення телескопів на карті України показане на рис. 20. Зараз за допомогою системи УРАН вимірюються модулі функцій видності та їх залежності від бази, частоти та часового кута. Це дозволяє визначати структуру радіоджерел на декаметрових хвилях шляхом комп'ютерного моделювання та використання радіозображень, отриманих на більш високих частотах.

Головні параметри українських радіоастрономічних низькочастотних антен наведені у табл. 4.1.

Останніми роками виконується черговий етап глибокої модернізації та покращення усіх параметрів антенних систем УТР-2 та УРАН. Організовано комплексні високоточні вимірювання та контроль параметрів з використанням сучасної контрольно-вимірювальної та комп'ютерної техніки (рис. 21). Це дозволило виявити низку невідомих раніше дефектів у складній антенній системі, що має десятки тисяч різних типів елементів, а також визначити шляхи підвищення надійності системи та покращення методів розрахунків параметрів антен і еталонування усіх їх складових частин.

Таблиця 4.1. Основні параметри українських декаметрових радіотелескопів

Радіотелескоп; координати	Частотний діапазон, МГц	Розмір, м; максимальна ефективна площа, м ²	Кількість елементів ($l \times m = N$); поляризація	Розмір променя на 25 МГц	Відстань від УТР-2 (LOFAR), км	РНДБ роздільна здатність на 25 МГц (УТР-2 – УРАН)
УТР-2 (РІ НАНУ); 49°39' пн. ш., 36°56' сх. д.	8 ÷ 33	1800×900; 140000	2040; 1 лінійна	0.4°×0.4°	0 (≈ 2000)	–
УТР-2 (плече Південь–Північ)	8 ÷ 33	1800×53; 105000	240×6 = 1440; 1 лінійна	0.3°×12°	0 (≈ 2000)	–
УТР-2 (плече Захід)	8 ÷ 33	900×45; 40000	6×100 = 600; 1 лінійна	0.6°×12°	0 (≈ 2000)	–
УРАН-1 (РІ НАНУ); 49°40' пн. ш., 36°21' сх. д.	8 ÷ 33	200×29; 5500	4×24 = 96; 2 лінійні	5°×30°	42 (≈ 1950)	59"
УРАН-2 (ПГО НАНУ); 49°38' пн. ш., 34°50' сх. д.	8 ÷ 33	238×116; 28000	16×32 = 512; 2 лінійні	3.5°×7.5°	150 (≈ 1850)	16'
УРАН-3 (ФМІ НАНУ); 51°29' пн. ш., 23°50' сх. д.	8 ÷ 33	238×58; 14000	8×32 = 256; 2 лінійні	3.5°×15°	946 (≈ 1100)	2.6"
УРАН-4 (РІ НАНУ); 46°24' пн. ш., 30°16' сх. д.	8 ÷ 33	238×29; 7000	4×32 = 128; 2 лінійні	3.5°×30°	613 (≈ 1500)	4"
ГУРТ, одна субрешітка, (РІ НАНУ); 49°39' пн. ш., 36°56' сх. д.	8 ÷ 80	18×18; 650 (на 10 МГц)	5×5 = 25; 2 лінійні	30°×30°	≈ 1 (≈ 2000)	–

Особливої уваги приділено цілковитій заміні систем автоматизації та управління антенами радіотелескопів, включно зі створенням і впровадженням нової цифрової апаратури, а також програмного забезпечення з урахуванням виявлених похибок наведення і можливостей комп'ютерної техніки нового покоління (рис. 22). Автоматизація торкнулася усіх аспектів роботи радіотелескопів, зокрема, вибору режимів їх роботи та багатоступеневого калібрування систем. Використання сучасних інформаційних та телекомунікаційних технологій дозволило суттєво підвищити ефективність роботи та покращити функціональні можливості українських радіоастрономічних антен декаметрового діапазону хвиль [17].

5. Радіотелескоп нового покоління ГУРТ

Останніми роками в усьому світі має місце бурхливий прогрес низькочастотної радіоастрономії. Він пов'язаний як з глибокою модернізацією існуючих інструментів, так і зі створенням радіотелескопів нового покоління. До них належать система LOFAR (центральна частина знаходиться у Нідерландах, окремі станції встановлені у Німеччині, Франції, Великій Британії, Швеції, Ірландії, Польщі, Латвії) для спостережень

у діапазонах (10)30 ÷ 80 МГц та 110 ÷ 240 МГц та радіотелескопи LWA (США), що працює на частотах 20 ÷ 80 МГц, MWA (Австралія) – на частотах 50 ÷ 300 МГц, SKA-low – на частотах 200 ÷ 1000 МГц. У цих системах використовуються останні досягнення електронних, телекомунікаційних та інформаційних технологій, забезпечуються високі чутливість, роздільна здатність, велике поле зору і можливості картографування.

На тлі цих закордонних прогресивних розробок радіотелескопи УТР-2 і УРАН залишаються неперевершеними за головними параметрами, особливо на частотах нижчих за 30 МГц, які є виключно цінними для астрофізики. Для закріплення і розвитку вітчизняного пріоритету у цій актуальній галузі фундаментальної і прикладної науки в Україні близько 15 років тому розпочато створення додаткового радіотелескопа нового покоління ГУРТ (Гігантський Український Радіотелескоп) з активними антенними елементами [17, 25]. Це стало можливим насамперед завдяки Цільовій комплексній програмі НАН України. Даний проект акцентований на поступову реалізацію великої адитивної ефективної площі $>10^4$ м² з високим фактором запов-

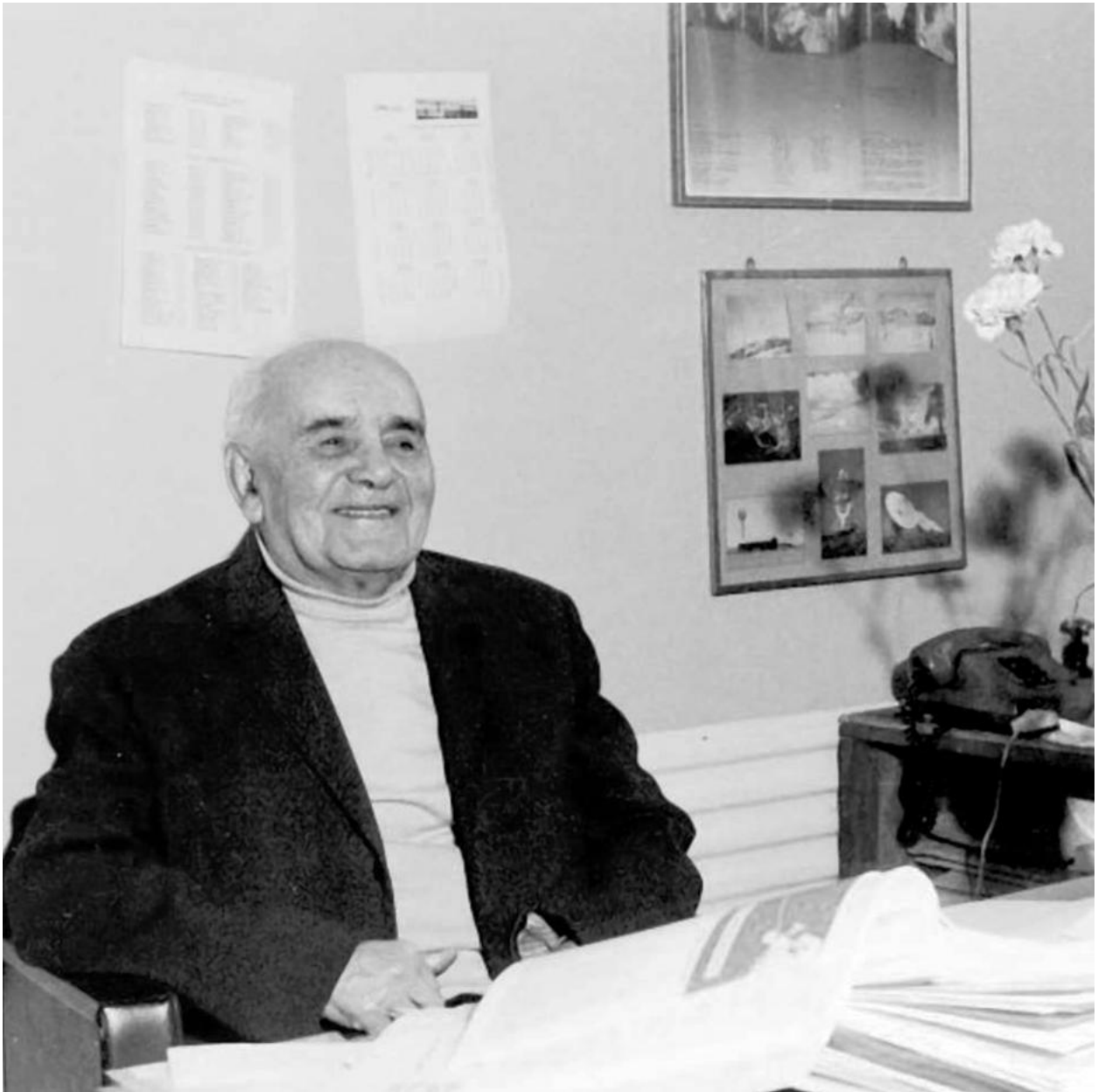


Рис. 1. Семен Якович Брауде на робочому місці в день свого 85-річчя 28 січня 1996 р. [14]



Рис. 2. Перший в Україні 24-елементний радіотелескоп декаметрових хвиль ID-1(2) діапазону $10 \div 25$ МГц, споруджений в обсерваторії поблизу с. Гракове Харківської обл. на початку 60-х років

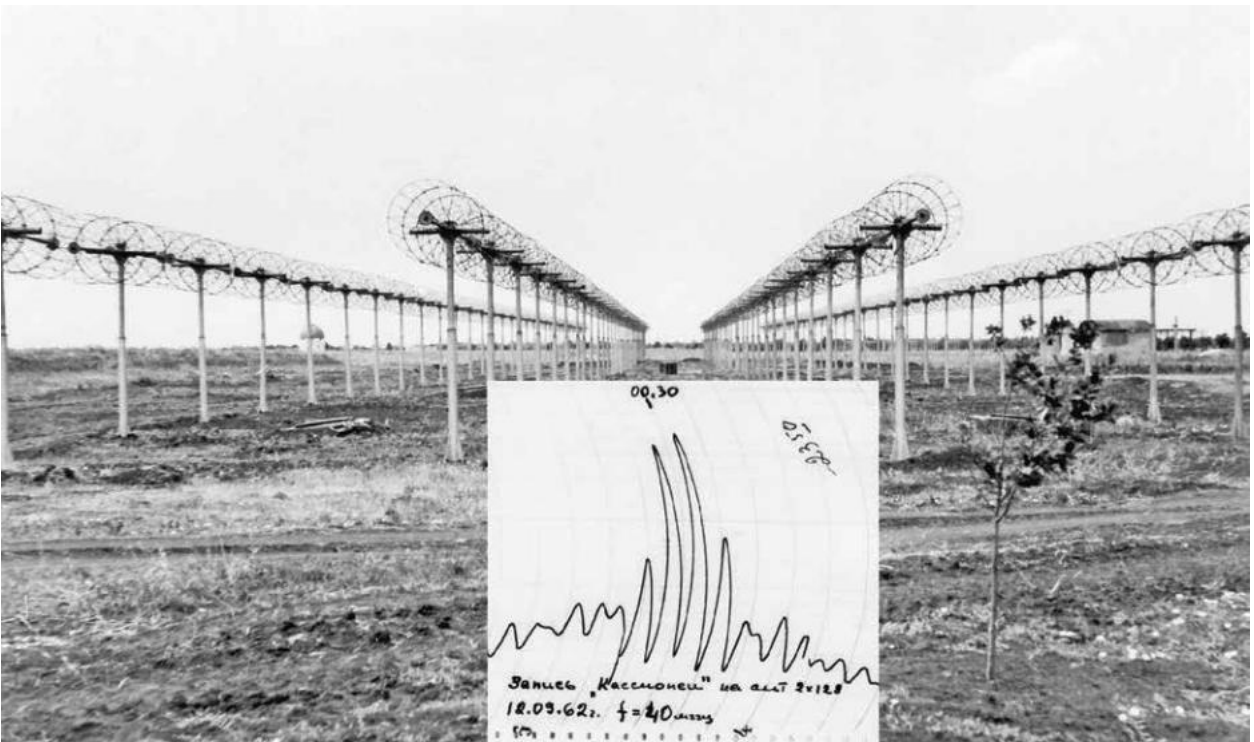


Рис. 3. 128-елементна антенна решітка діапазону $20 \div 40$ МГц. На вставці наведений один із перших радіоастрономічних записів. За півроку до отримання цих записів, у лютому 1962 р., Борис Євгенович Патон став Президентом Академії наук України

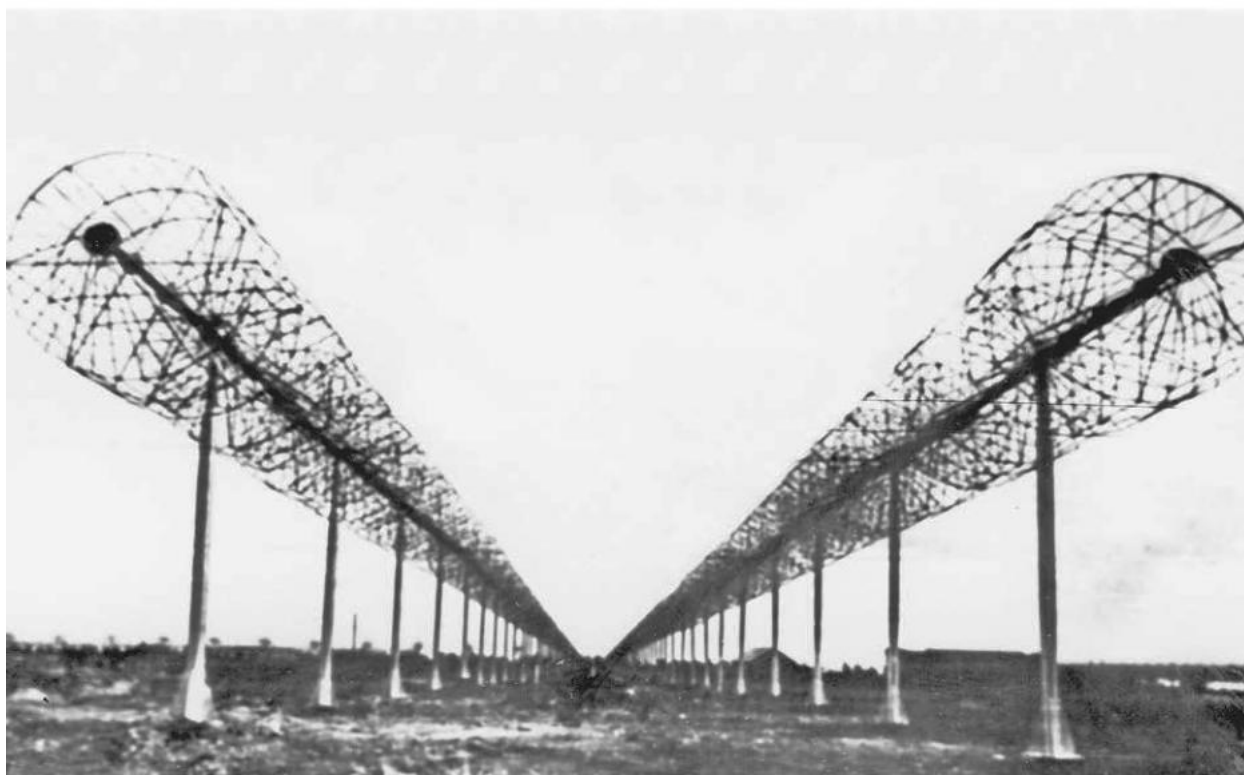
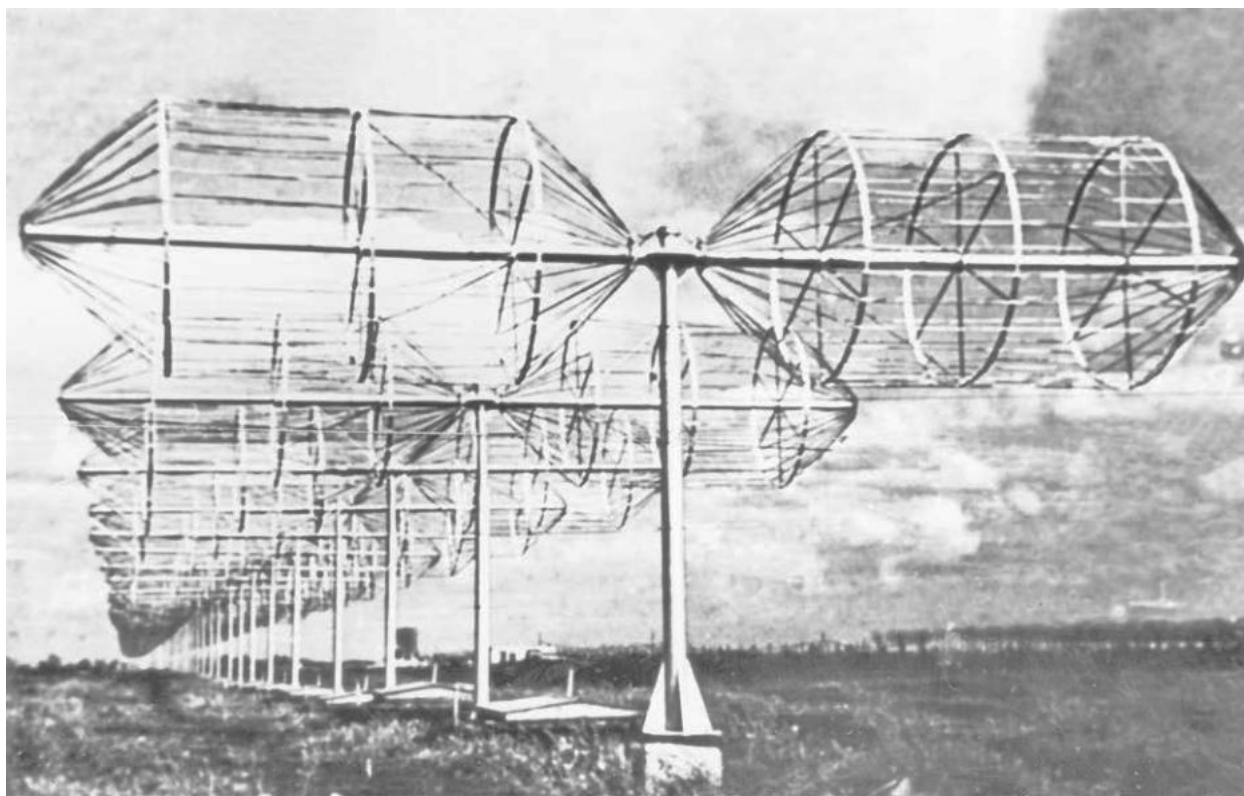


Рис. 4. Антени Північ–Південь і Схід–Захід радіотелескопа УТР-1 діапазону $10 \div 25$ МГц – першого Т-подібного радіотелескопа у Європі

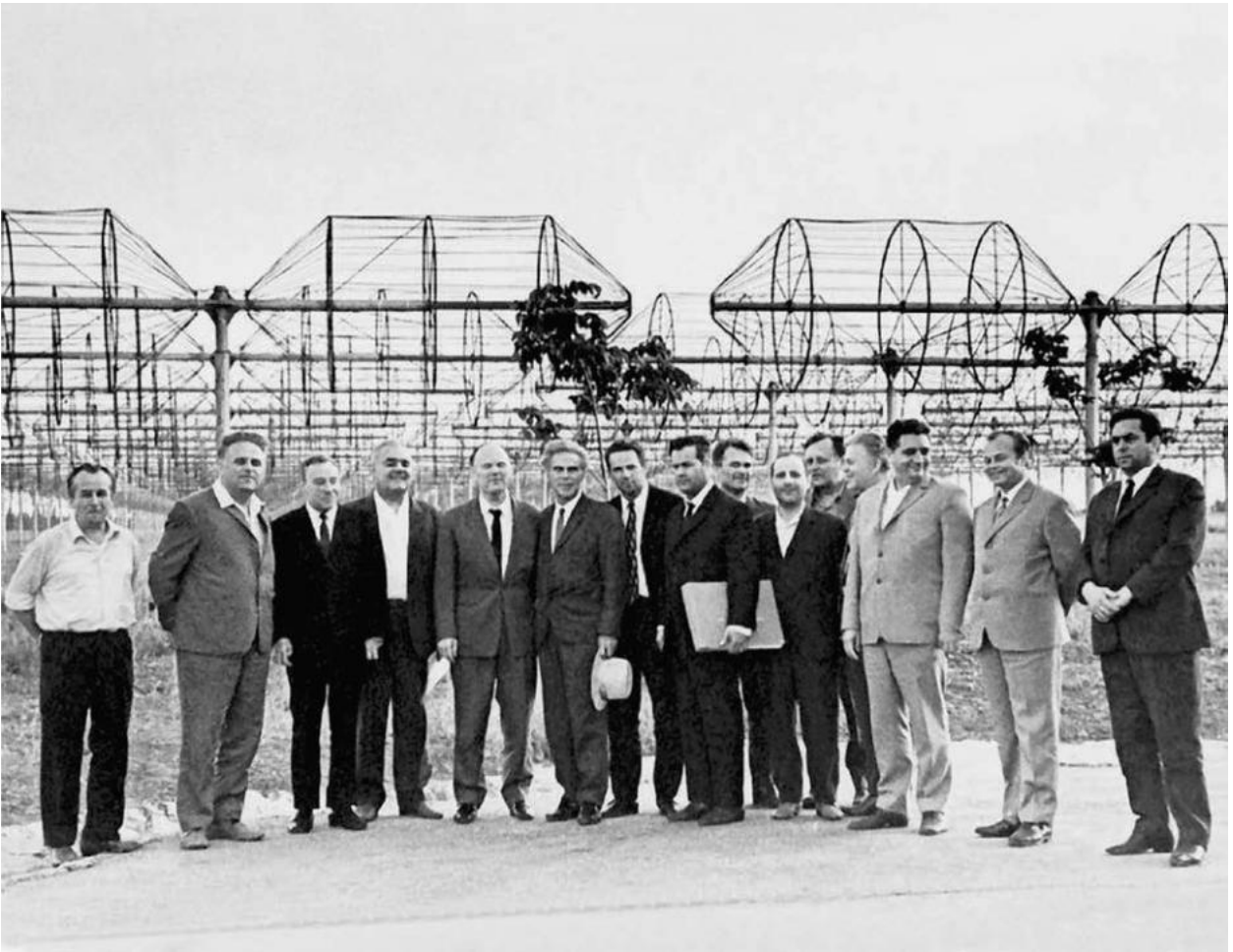


Рис. 5. Борис Євгенович Патон і Семен Якович Брауде із членами Президії Академії наук України під час введення в дію нового гігантського радіотелескопа УТР-2 4 червня 1971 р. [32]



Рис. 6. Засновники вітчизняної радіоастрономії під час Всесоюзної радіоастрономічної конференції у вересні 1976 р. Зліва направо: І. С. Шкловський, О. О. Пістолькорс, М. С. Кардашов, С. Я. Брауде, А. Д. Кузьмін, О. Є. Соломонович, Г. Г. Гетманцев, Р. Л. Сороченко, Ю. М. Парийський [32]



Рис. 7. Президент Академії наук України Борис Євгенович Патон представляє директора новоствореного Радіоастрономічного інституту Леоніда Миколайовича Литвиненка (квітень 1985 р.) [14]



Рис. 8. Антена Північ–Південь радіотелескопа УТР-2 узимку в день народження С. Я. Брауде 28 січня



Рис. 9. Антена Схід–Захід радіотелескопа УТР-2



Рис. 10. Антенні підсилювачі другого ярусу радіотелескопа УТР-2 розробки початку 70-х років

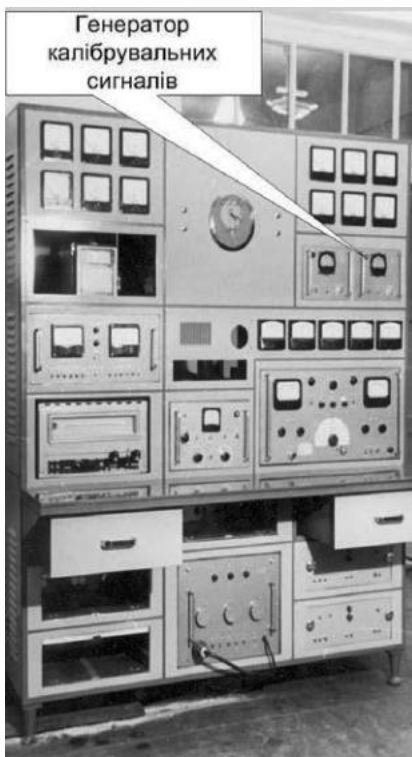


Рис. 11. Антенні підсилювачі нового покоління для однієї смуги частот



Антенні підсилювачі нового покоління

Рис. 12. Комплект нових 3-смугових антенних підсилювачів четвертого ярусу радіотелескопа УТР-2



Генератор калібрувальних сигналів

Рис. 13. Пульта управління та оперативного контролю антен Північ–Південь і Схід–Захід поряд із блоком формування променів УТР-2. Ліворуч показана калібрувальна і модуляційна стійка. Після багатьох етапів вдосконалення в ній працює лише генератор калібрувальних сигналів





Рис. 14. Підземний колектор радіотелескопа УТР-2

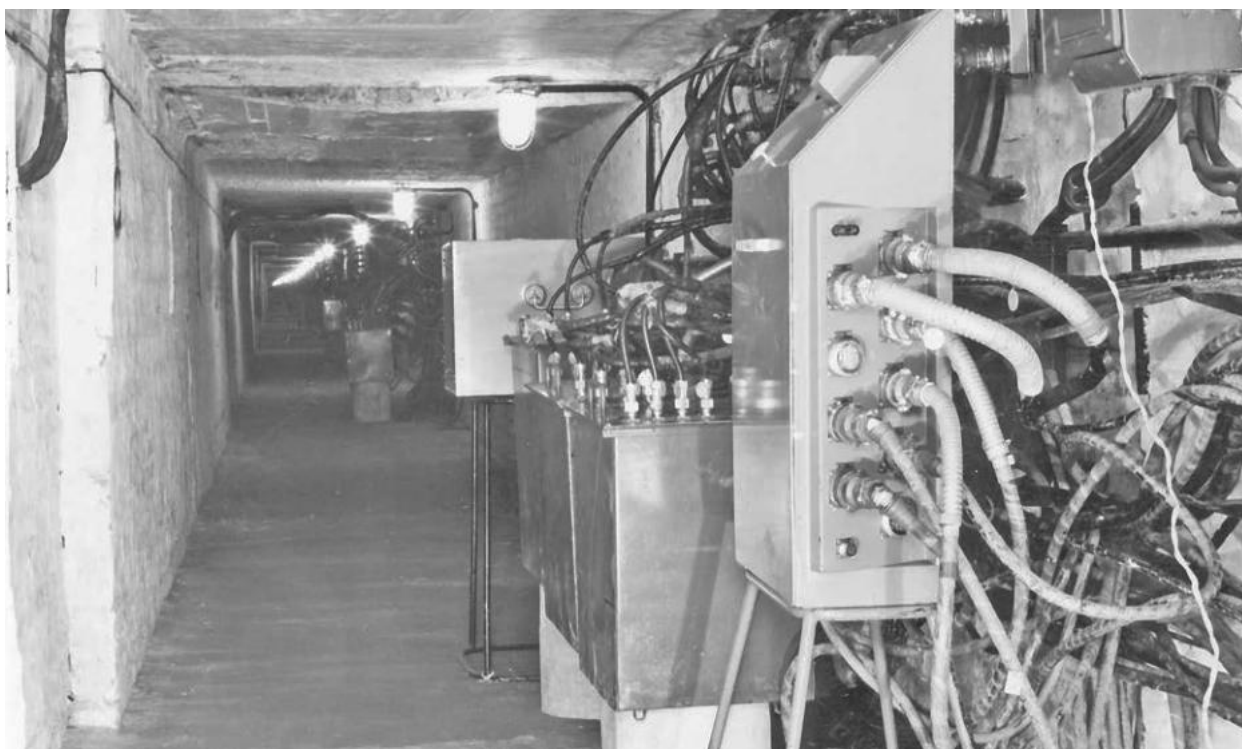


Рис. 15. Вихідна апаратура однієї із секцій радіотелескопа

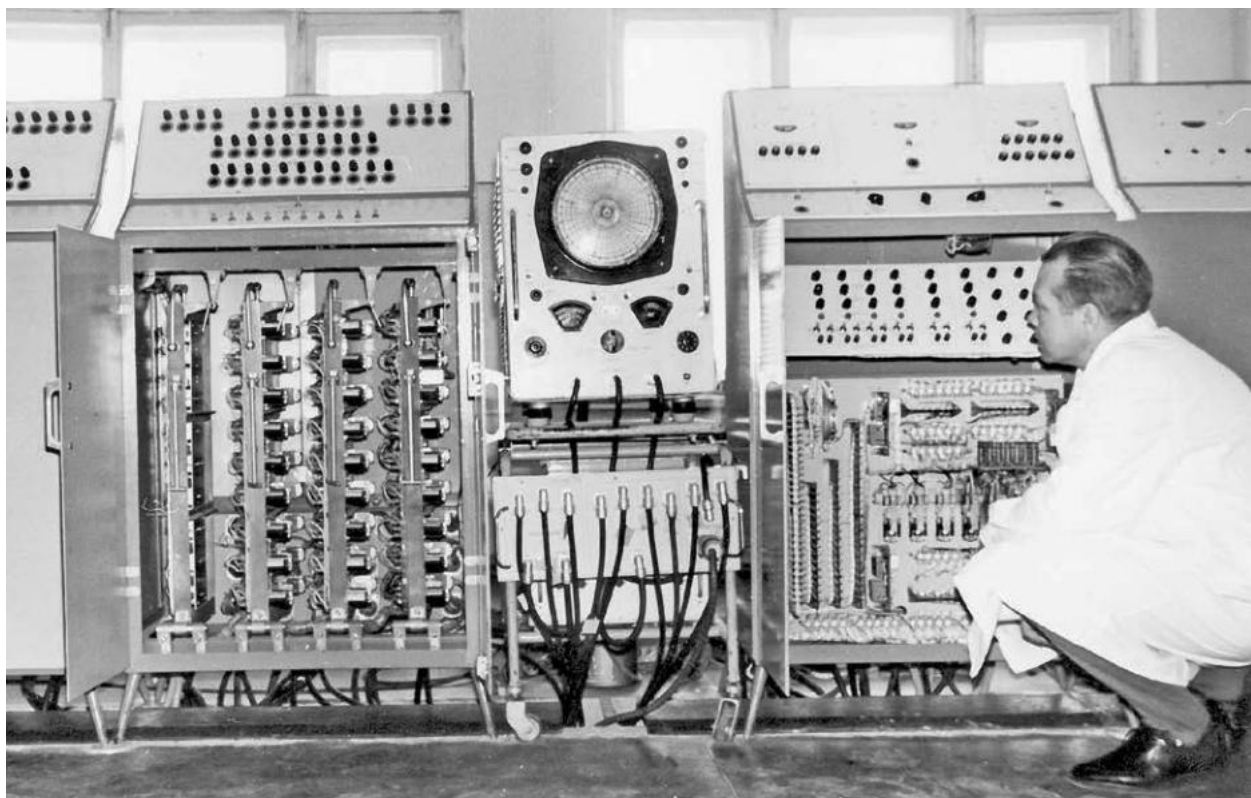


Рис. 16. Апаратура контролю функціонування радіотелескопа та (внизу) за роботою М. Ю. Гончаров (ліворуч) і М. К. Шарикін (1971 р.)

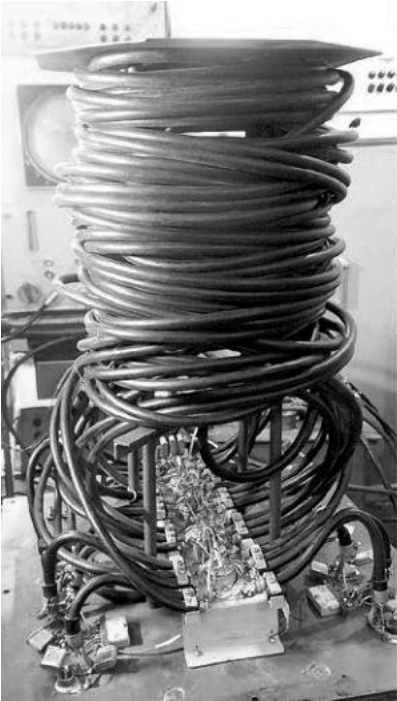


Рис. 17. Один з фазообертачів типу ФВ 6-4 (корпус знятий)



Рис. 18. Найбільший фазообертач системи фазування радіотелескопа УТР-2 типу ФВ 8-11



Рис. 19. Радіотелескопи УРАН-1, ..., УРАН-4 радіоінтерферометричної системи УРАН [32]



Рис. 20. Розташування радіотелескопів декаметрових хвиль на території України (біля кожного пункту поміщений космічний знімок відповідного радіотелескопа)



Рис. 21. Вимірювання параметрів елементів радіотелескопа у підземних колекторах

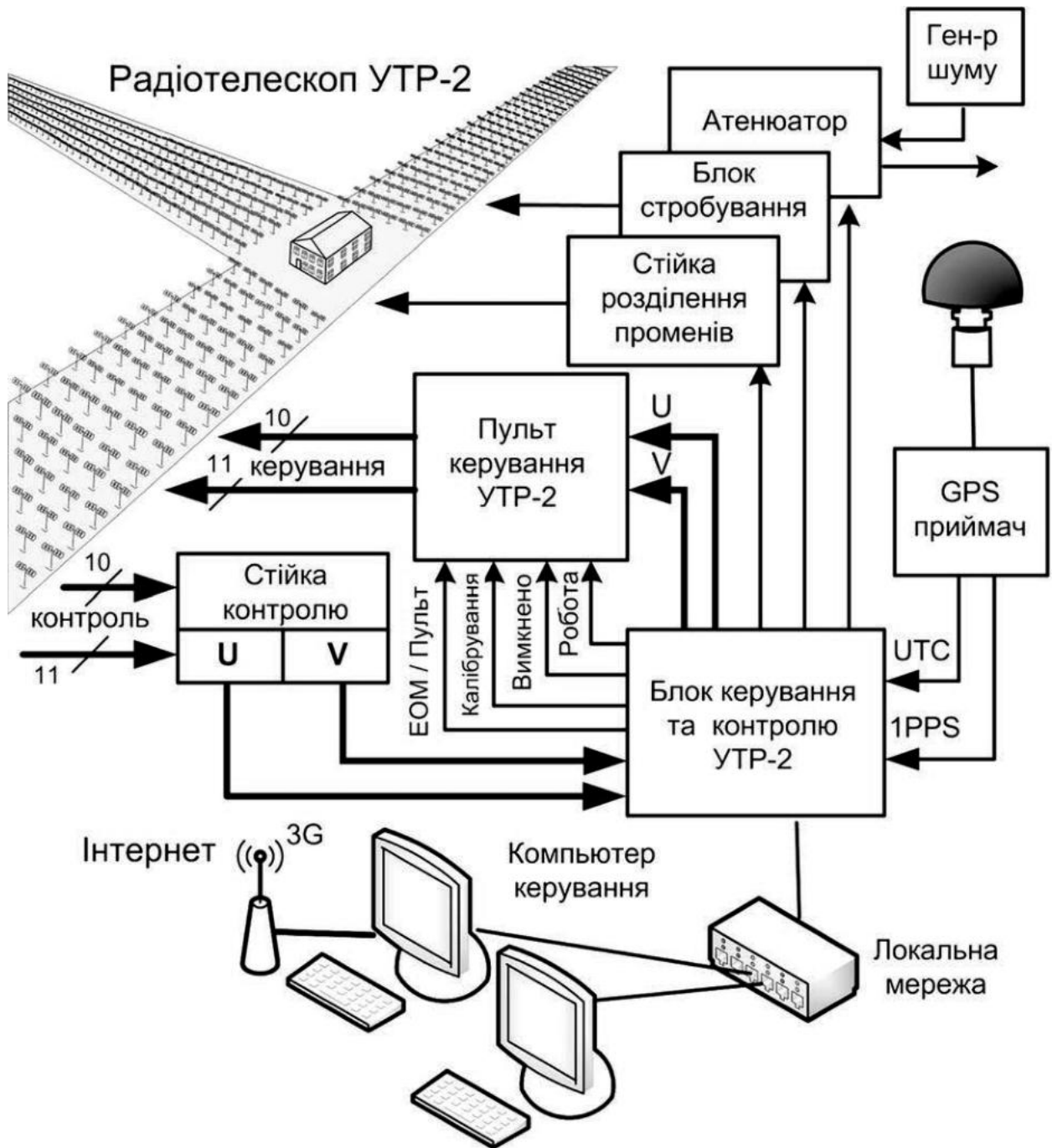


Рис. 22. Блок-схема цифрової апаратури нового покоління для управління радіотелескопом

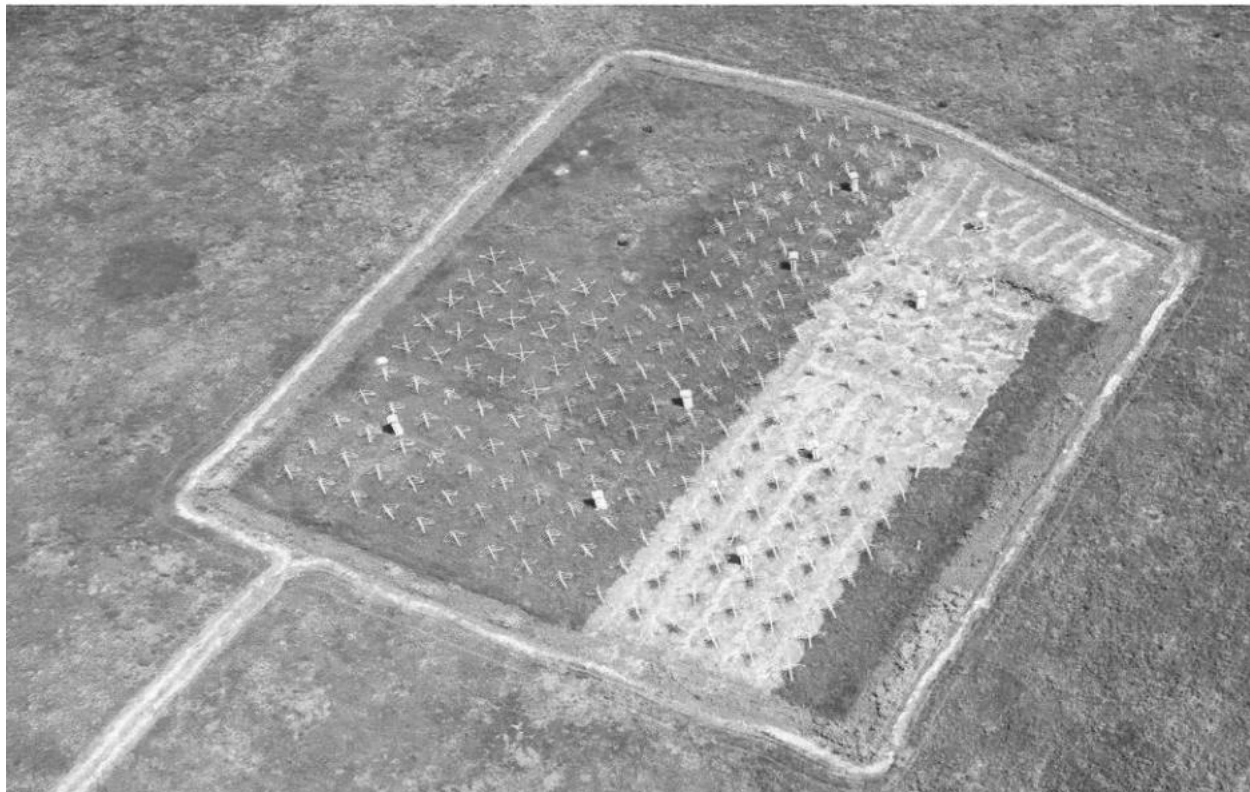


Рис. 23. Радіотелескоп нового покоління ГУРТ (9×25 двополяризованих елементів): зверху – зовнішній вигляд решіток, знизу – вигляд з квадрокоптера



Рис. 24. Апаратурна шафа субрешітки радіотелескопа ГУРТ



Рис. 25. Лабораторне приміщення радіотелескопа ГУРТ із цифровим реєстратором ADR



Рис. 26. Розташування радіотелескопів УТР-2 та ГУРТ в Обсерваторії імені С. Я. Брауде

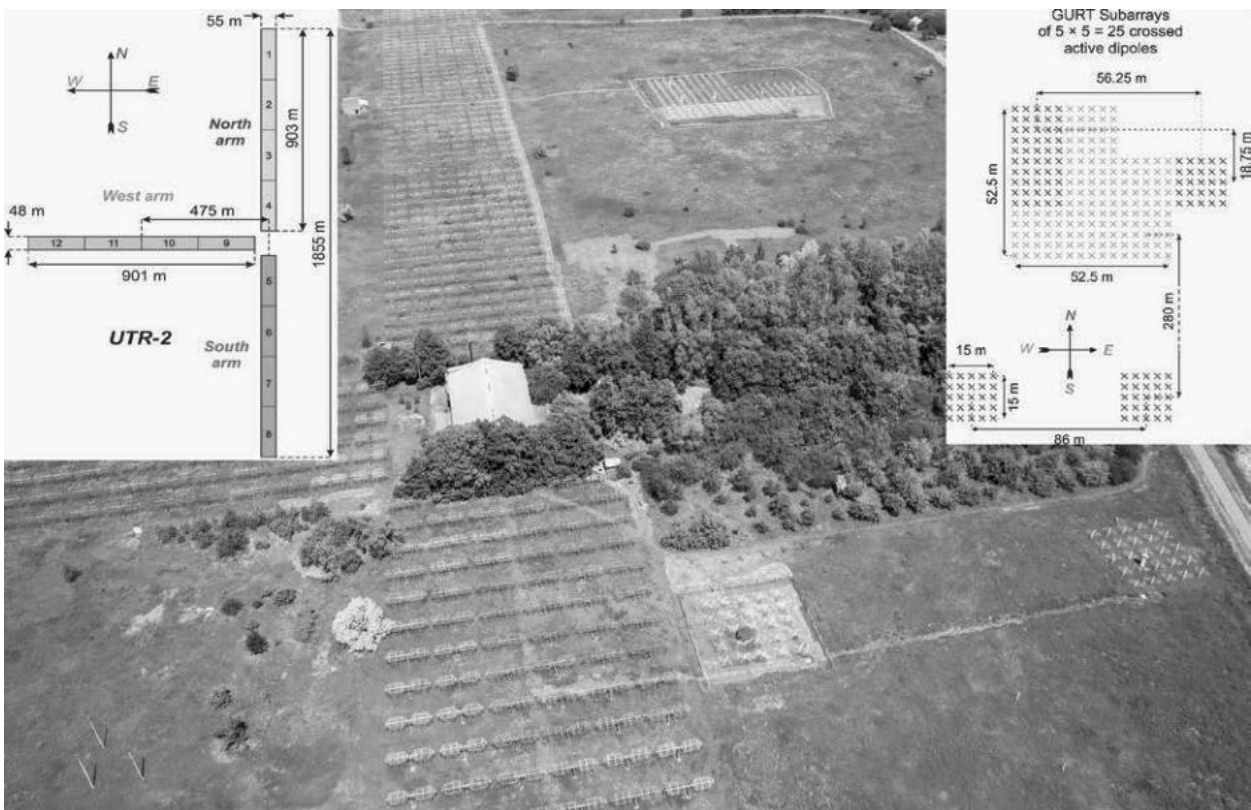


Рис. 27. Вигляд радіотелескопів УТР-2 та ГУРТ з висоти пташиного польоту



Рис. 28. Приймальна апаратура радіотелескопа УТР-2 на початку 70-х років; на фото науковці Б. П. Рябов (ліворуч), М. К. Шарикін (праворуч), М. Ю. Гончаров (на дальньому плані)

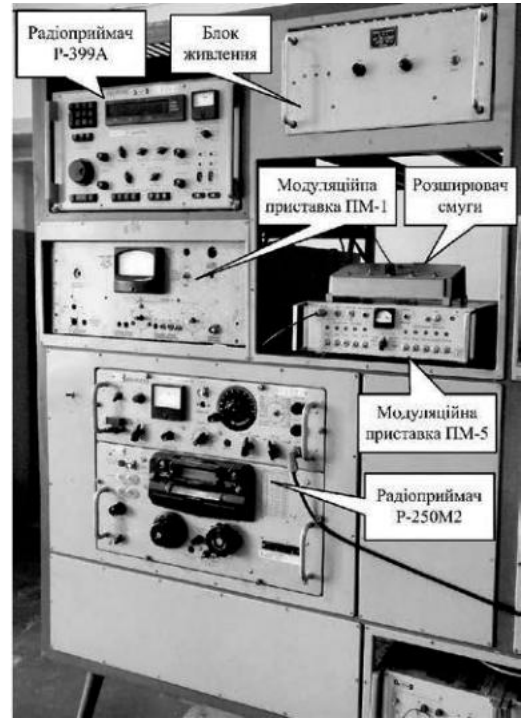


Рис. 29. Приймачі сигналів радіотелескопа УТР-2 різних поколінь

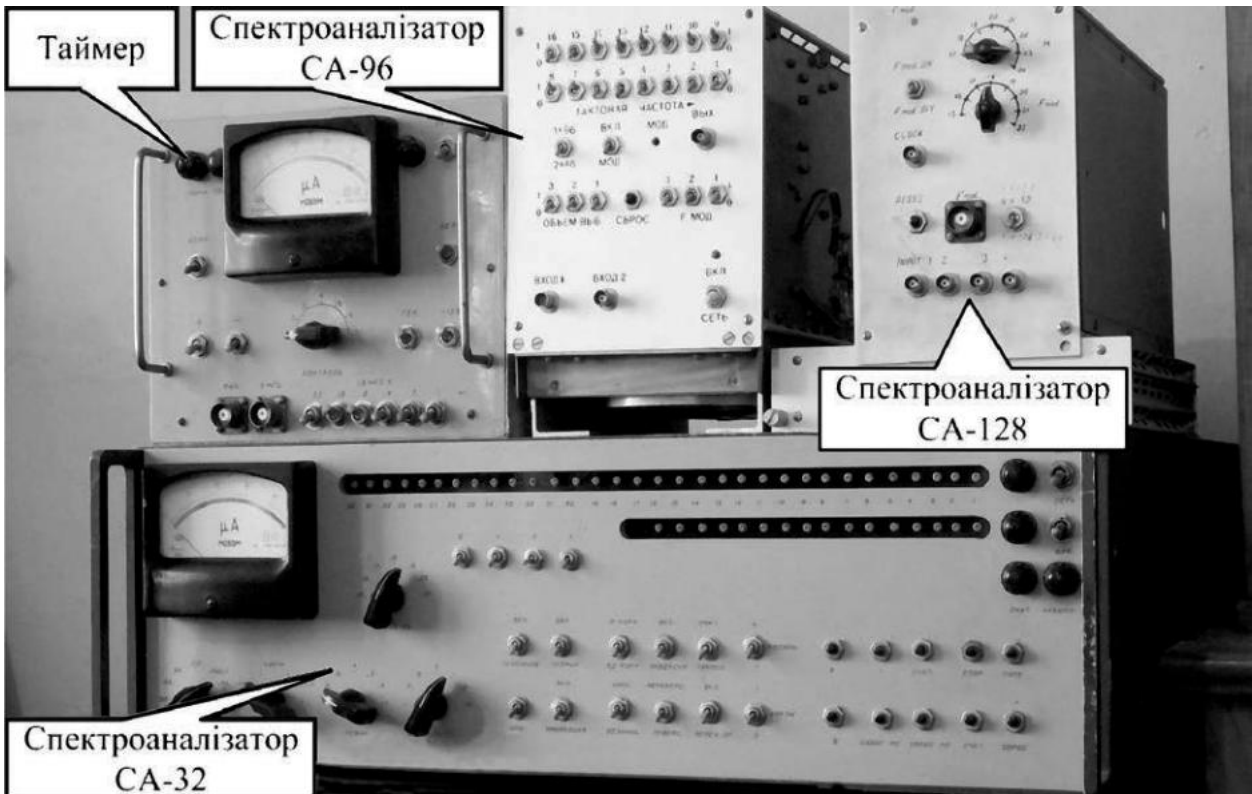


Рис. 30. Цифрова апаратура та кореляційні спектроаналізатори для пошуку та досліджень міжзоряних спектральних ліній



Рис. 31. Д. В. Шалунов (ліворуч) і С. В. Стьопкін за роботою на 4096-канальному цифровому кореляційному спектроаналізаторі [14]

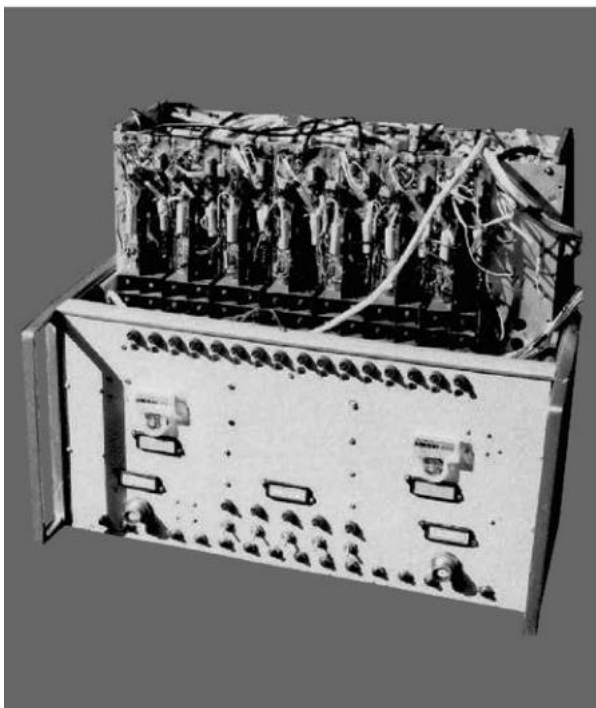


Рис. 32. Аналого-цифровий приймач для досліджень міжпланетних мерехтінгів та швидкоплинних процесів [14]

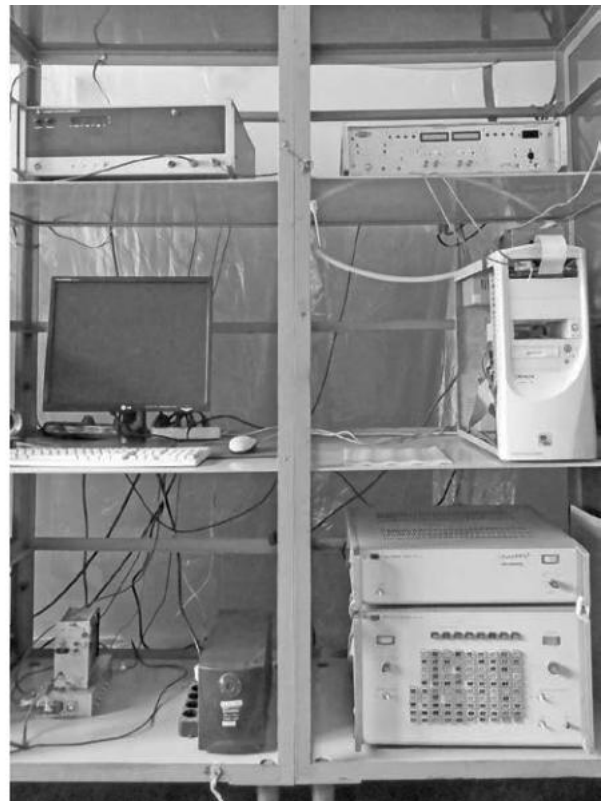


Рис. 33. Двочастотний двоканальний радіоінтерферометричний приймач для системи УРАН

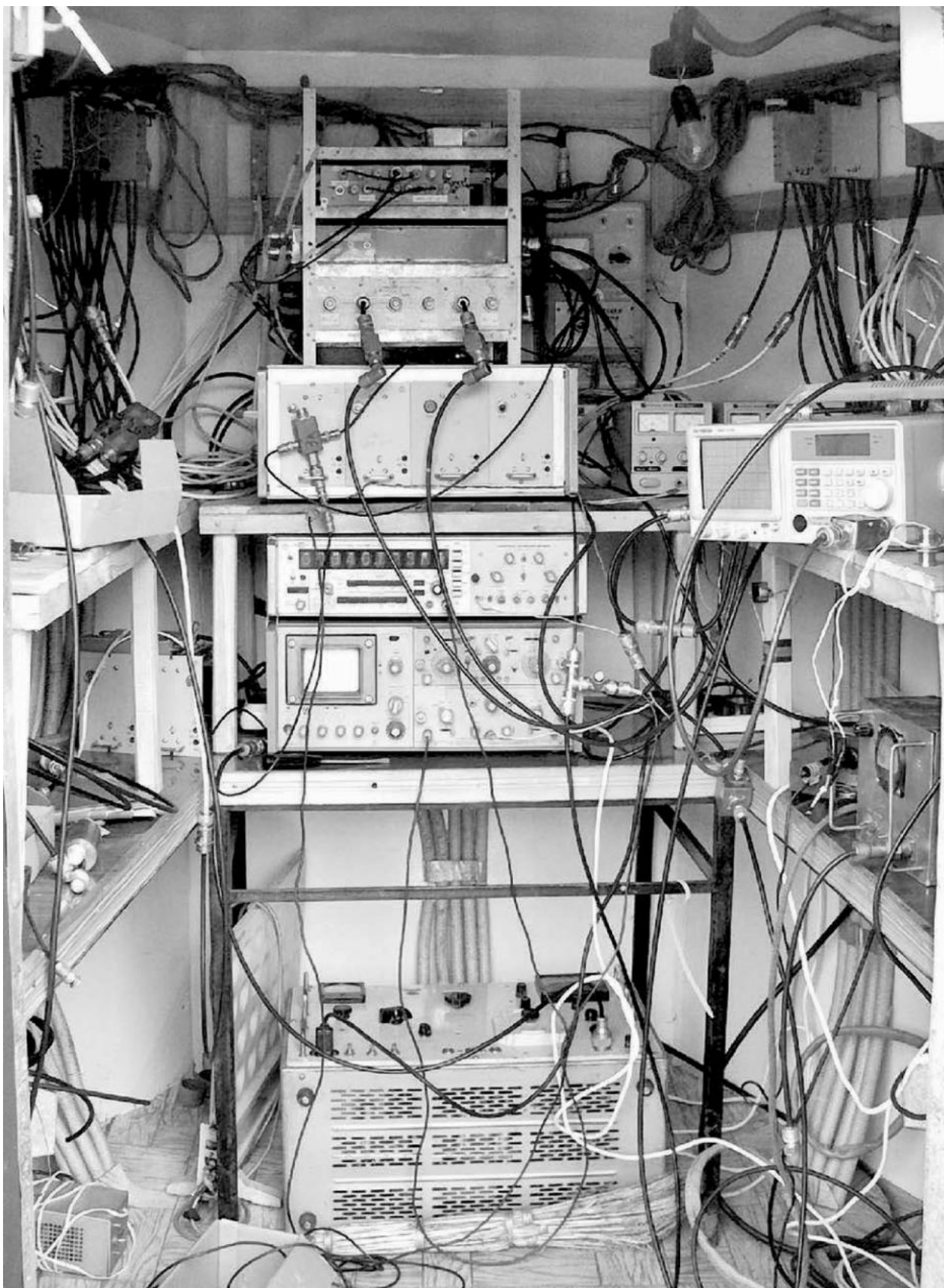


Рис. 34. Автоматизована система для моніторингу діелектричної проникності та провідності поверхні землі



Рис. 35. Перший у низькочастотній радіоастрономії широкопугмовий багаторозрядний цифровий приймач швидкого фур'є-аналізу в реальному часі DSP. Зліва направо: М. Лейтнер (Австрія); А. Лекашо, К. Розолен (Франція); Е. П. Абраїн, В. В. Захаренко (Україна) [14]

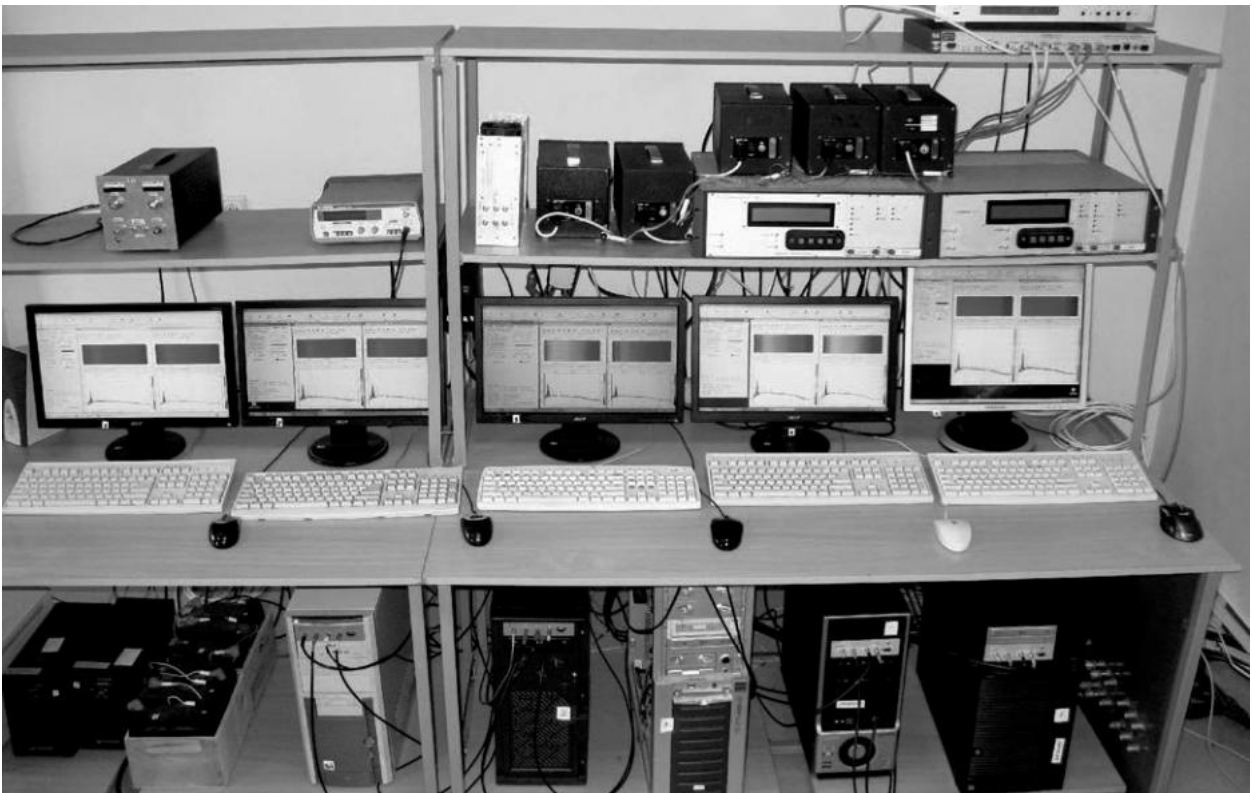


Рис. 36. Надширокопугмові багатоканальні цифрові приймачі з високим динамічним діапазоном DSP-Z (5 комплектів)

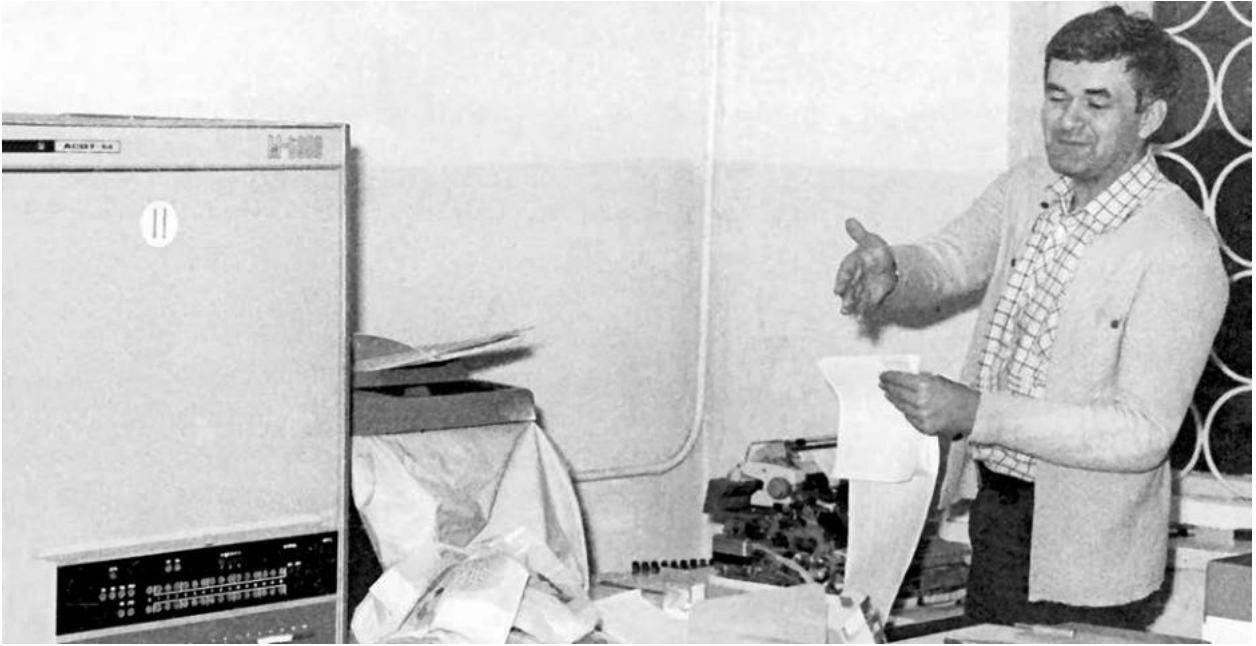


Рис. 37. Обчислювально-керуючий комплекс АСВТ М-6000 (використовувався з початку 70-х років до середини 90-х як перша головна комп'ютерна система для управління телескопом, цифрової реєстрації сигналів і обробки даних)



ПАРАМЕТРИ ТА РЕЖИМИ РОБОТИ СИСТЕМИ	СТАРА	НОВА
<i>Антенa</i>		
Діапазон частот	10-25 МГц	8 – 32 (40) МГц
Смуга частот	6 x 1 МГц = 6 МГц	24 (32) МГц
Калібрування, тестування, керування, Обладнання, програмування	~	висока продуктивність
<i>Приймальна апаратура</i>		
Кількість каналів	5 променів x 12 прийм. = 60 кан.	5 x 2 x 8192 = 81920 кан.
Смуга частот	10 кГц x 60 = 600 кГц	24(32) МГц
Часове розділення	20 мс	0,25 мс (до 1 мкс)
Частотне розділення	10 кГц	4 кГц (до 0,1 кГц)
Динамічний діапазон	40 дБ	90 дБ
Чутливість	10 Ян	10 мЯн
Режими вимірювань	Спектр потужності; Післядетекторна реєстрація	Спектр потужності; Комплексний крос-спектр; Фур'є перетворення реального часу; Пряма реєстрація

Рис. 38. Стара та нова апаратні зали радіотелескопа УТР-2 з приймально-реєструючими засобами. Наведені основні параметри апаратури [32]

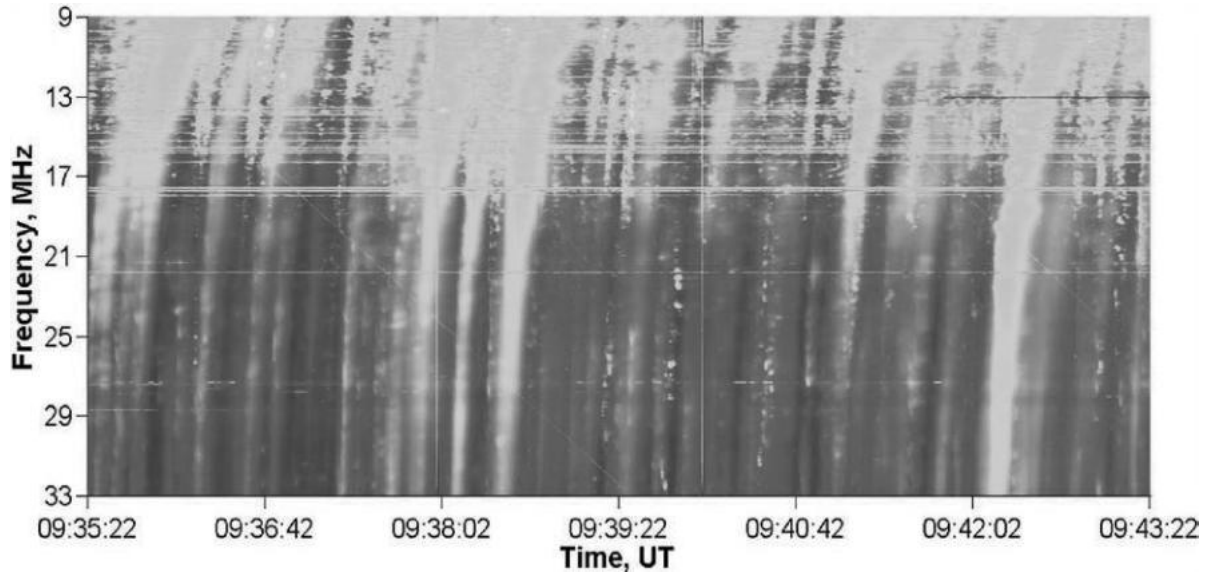


Рис. 39. Відкриття нових типів і особливостей спорадичного сонячного радіовипромінювання (спайки, сплески типу III-b та інші). Вдається реєструвати сонячну емісію навіть на частотах менших за 10 МГц, попри сильні радіозавади (горизонтальні лінії на динамічному спектрі) [17]

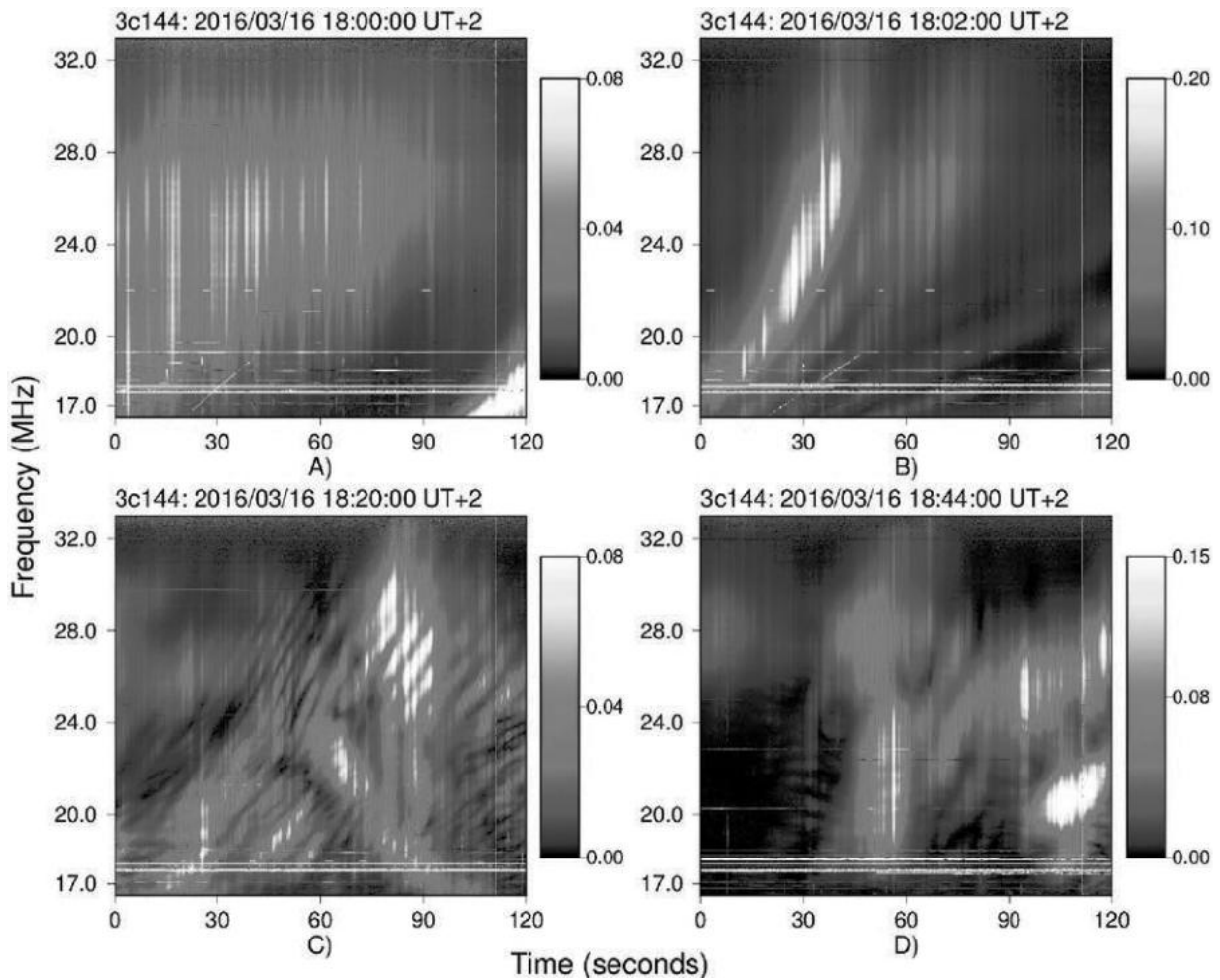


Рис. 40. Відкриття міжпланетних мерехтінь на тлі іоносферних на великих відстанях від Сонця, що важливо для вивчення проблем космічної погоди [32]

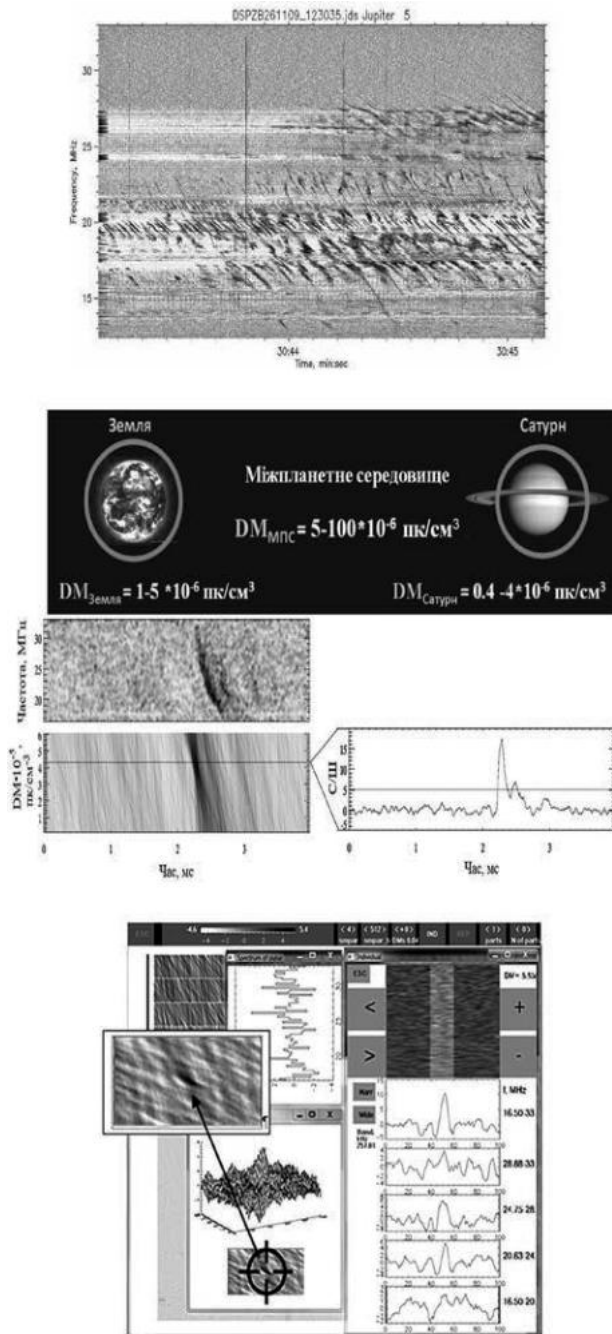


Рис. 41. Низькочастотне спорадичне та імпульсне випромінювання об'єктів сонячної системи та Галактики, що досліджується на радіотелескопах УТР-2, УРАН і ГУРТ. Вгорі – відкриття тонкої частотно-часової структури випромінювання Юпітера; всередині – відкриття сигналів від блискавок в атмосфері Сатурна, їх тонкої структури та дисперсії у міжпланетному середовищі; внизу – відкриття спорадичних (транзйентних) сигналів від галактичних об'єктів невідомої природи [32]

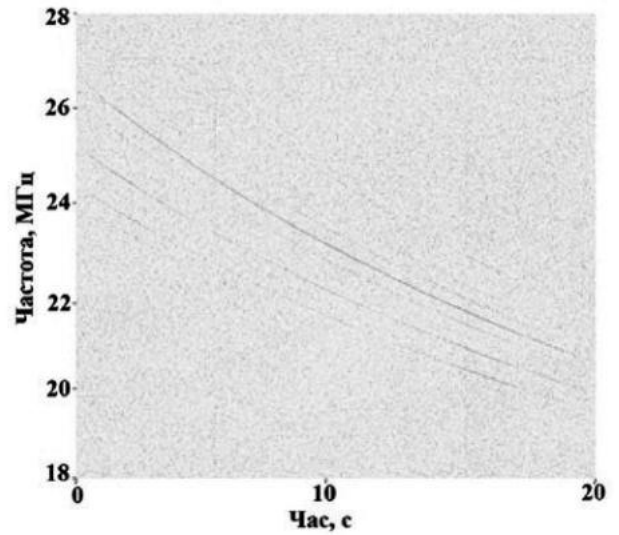


Рис. 42. Відкриття декаметрового імпульсного радіовипромінювання декількох десятків пульсарів, індивідуальних імпульсів, аномальних варіацій їх інтенсивностей, тонкої структури та рекордно великої дисперсійної затримки (понад 10 с) у міжзоряному середовищі [32]

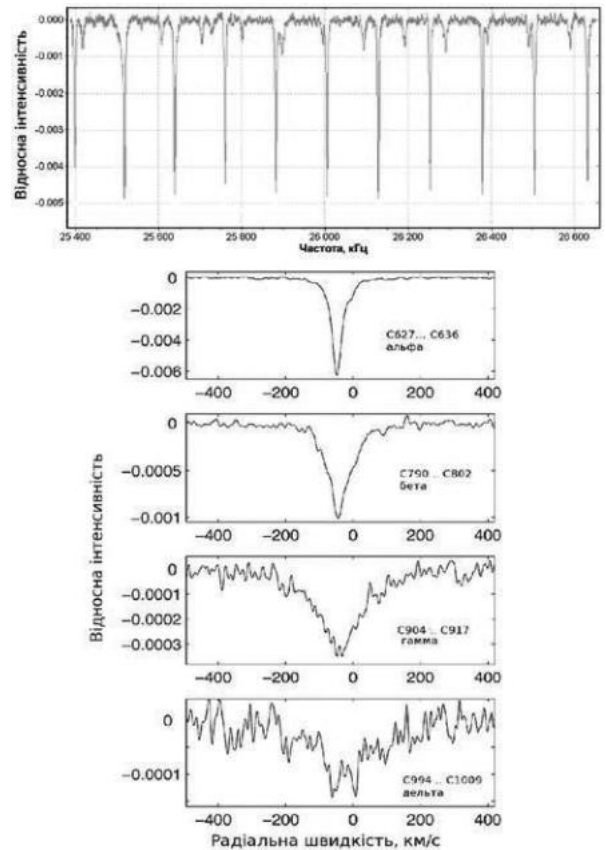


Рис. 43. Відкриття спектральних ліній вуглецю та водню, що відповідають рекордно високозбудженим станам (понад 1000) міжзоряних атомів [32]

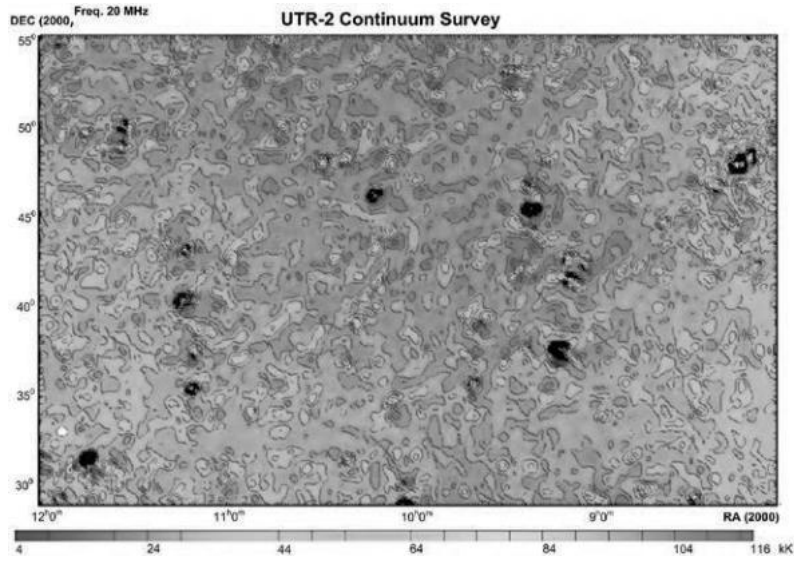


Рис. 44. Відкриття великої кількості дискретних та протяжних радіоджерел неперервного низькочастотного радіовипромінювання (емісійні туманності, залишки наднових, радіогалактики, галактичний та позагалактичний фон) [17]

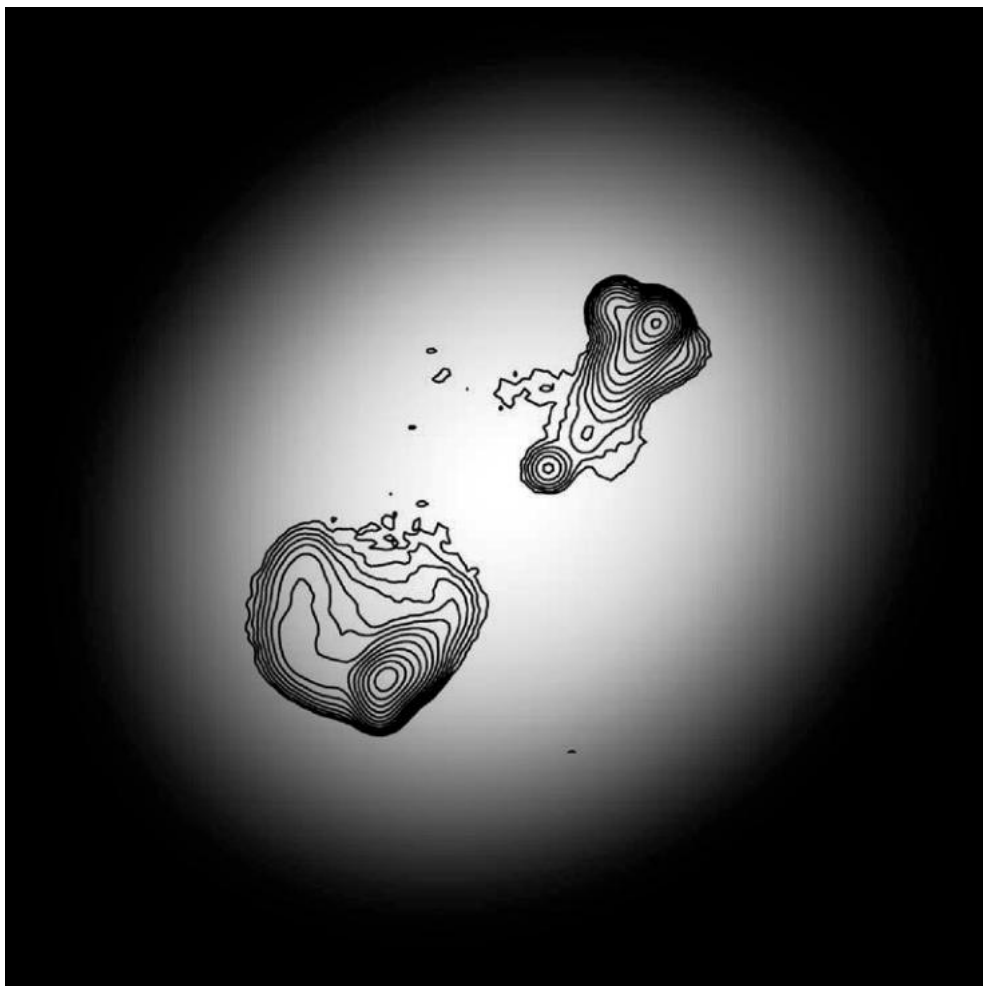


Рис. 45. Відкриття на декаметрових хвилях за допомогою РНДБ системи УРАН протяжних радіоstruktur великої вибірки радіогалактик і квазарів, які принципово відрізняються від радіозображень на високих частотах [14]

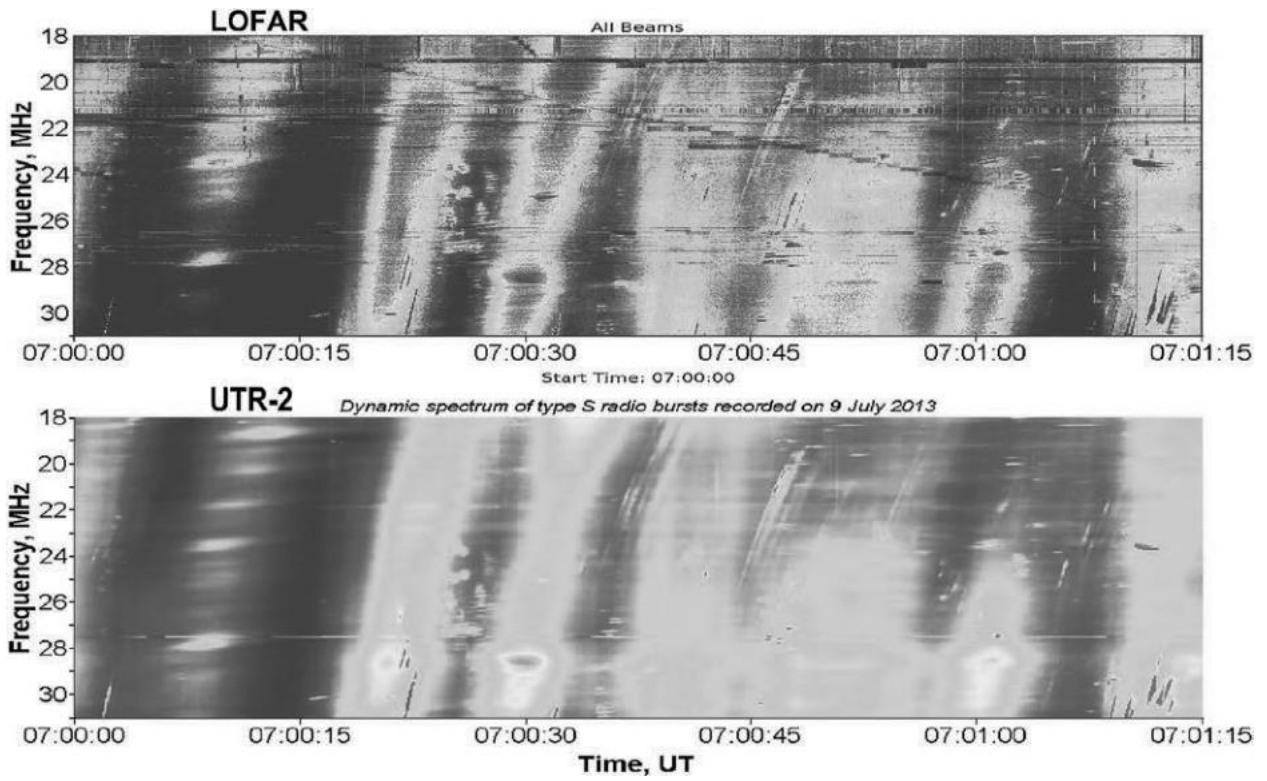


Рис. 46. Синхронні спостереження Сонця за допомогою радіотелескопів УТР-2 та LOFAR

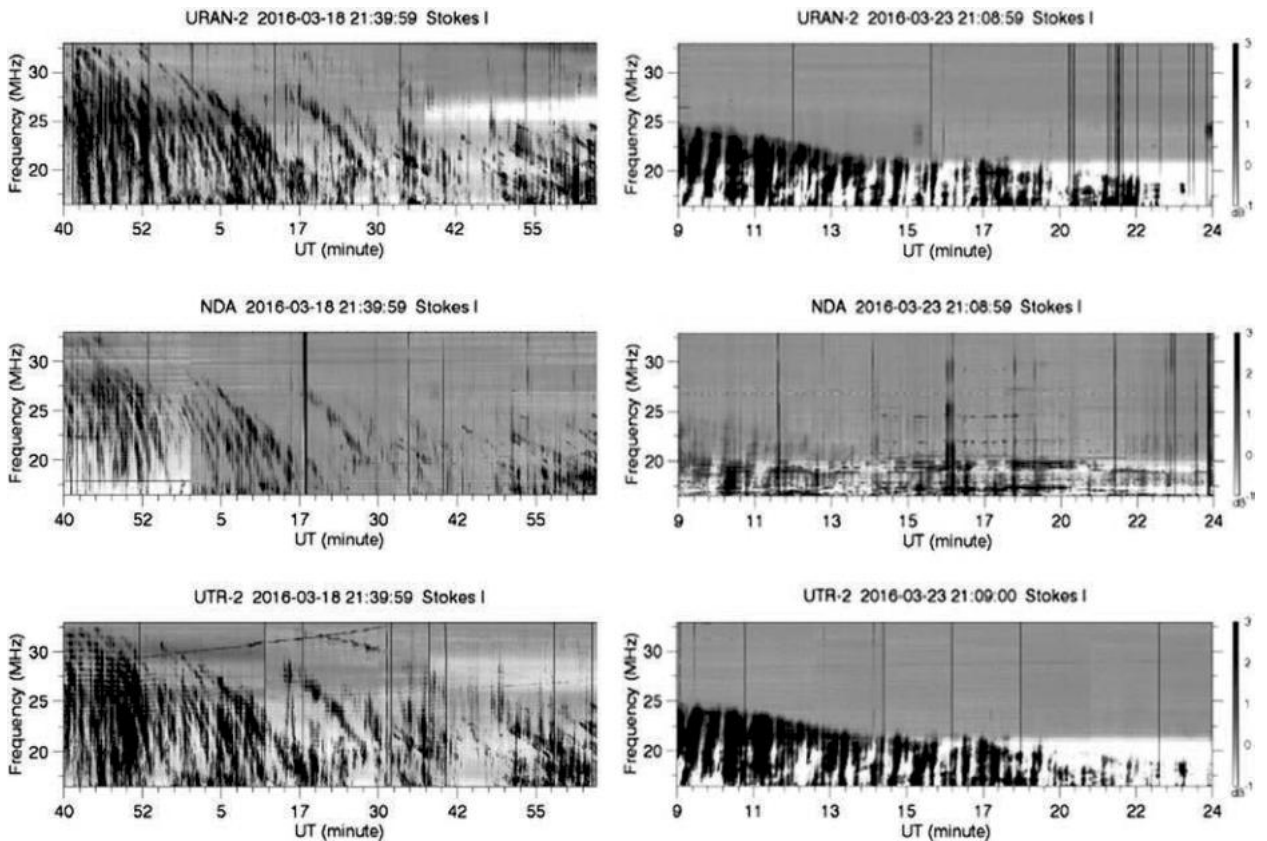


Рис. 47. Синхронні спостереження Юпітера за допомогою радіотелескопів УТР-2, УРАН-2 та NDA (Франція) [32]

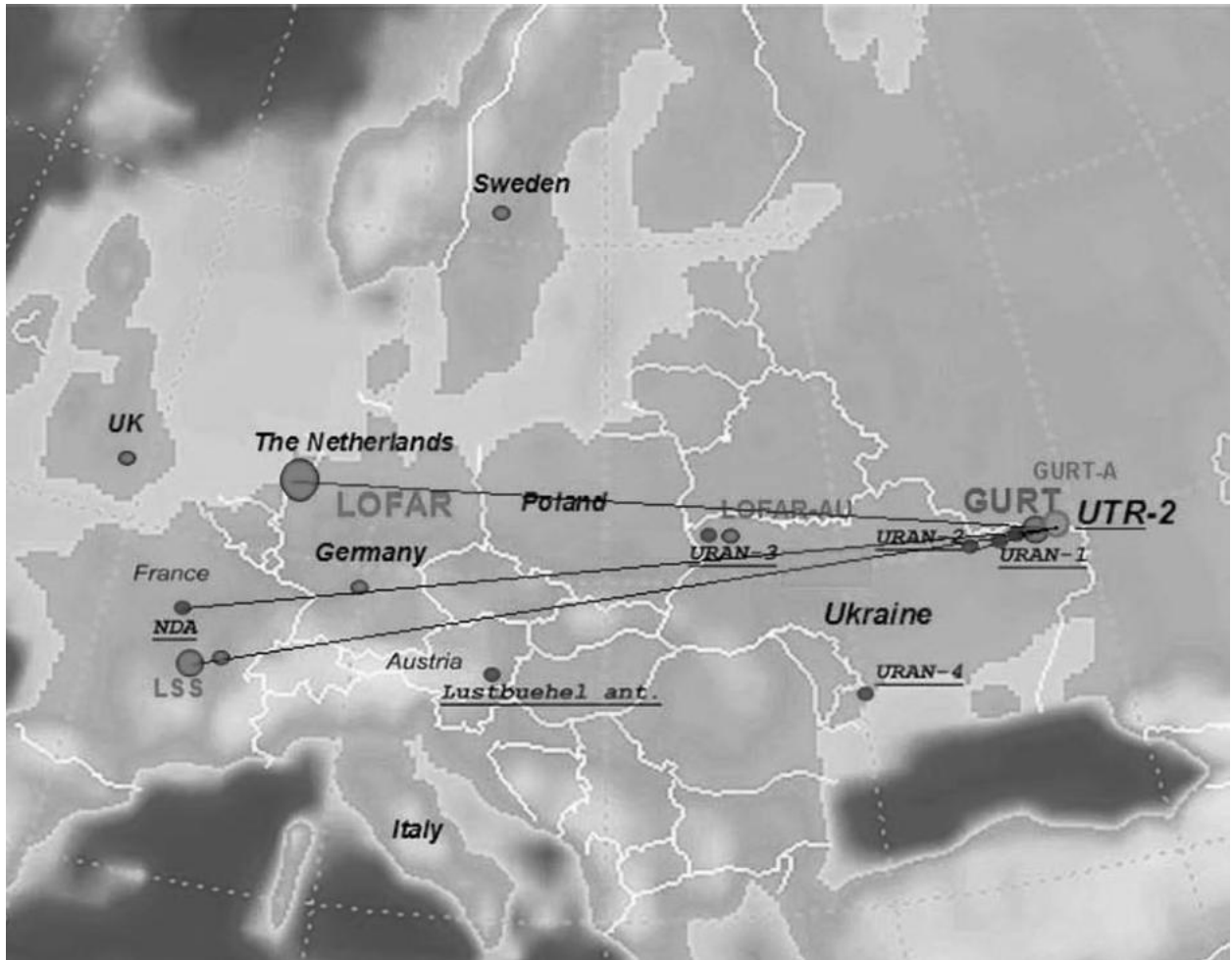


Рис. 48. Розташування сучасних низькочастотних радіотелескопів у Європі [32]

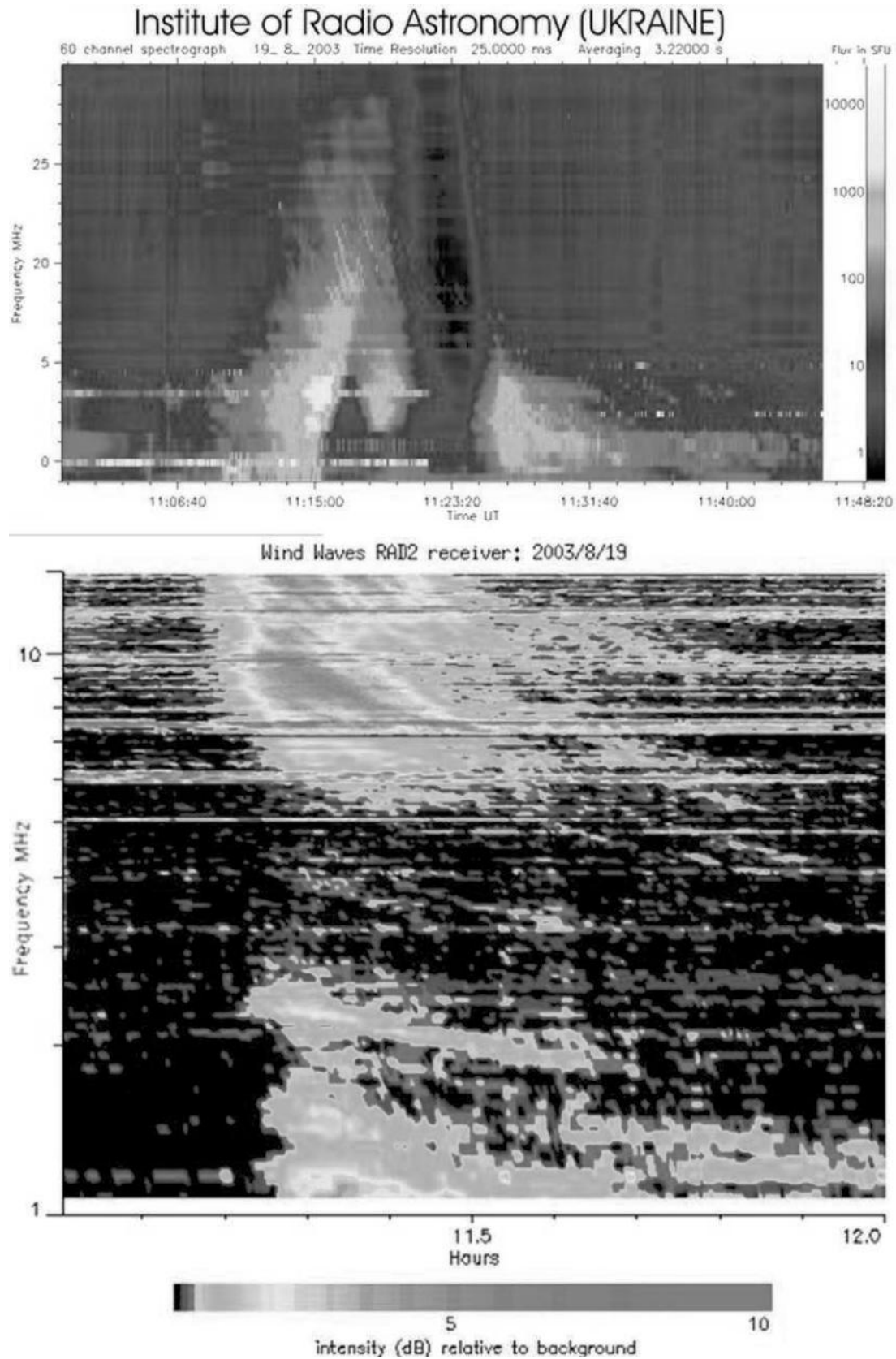


Рис. 49. Синхронні спостереження сплеску поглинання у сонячному спорадичному випромінюванні на радіотелескопі УТР-2 і космічному апараті WIND

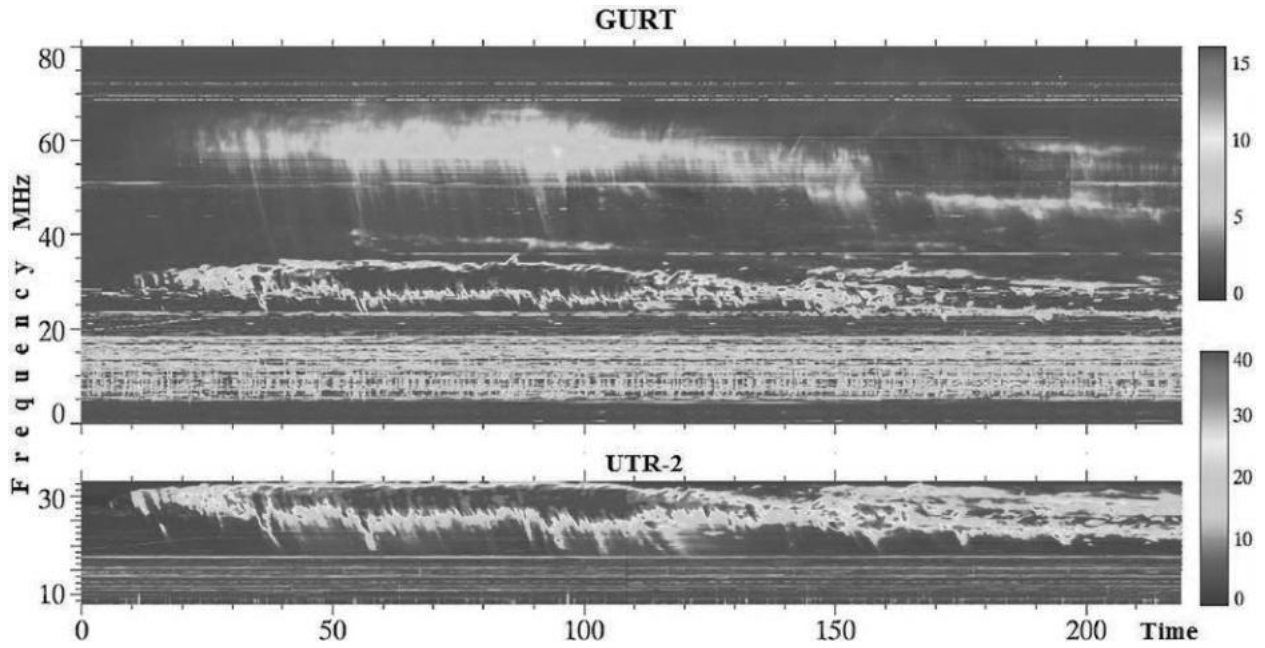


Рис. 50. Синхронні спостереження сонячного сплеску II типу на радіотелескопах УТР-2 та ГУРТ [32]



Рис. 51. Класики австралійської та світової радіоастрономії (ліворуч із четвертої по дев'яту особу, С. Я. Брауде – в центрі знімку) на радіотелескопі УТР-2. Це один з перших візитів закордонних вчених в Обсерваторію (початок літа 1975 р.)



Рис. 52. Відомий австралійський радіоастроном О. Б. Слі поруч з С. Я. Брауде (в центрі) біля радіотелескопа УТР-2 (травень 1978 р.)



Рис. 53. Засновник радіоастрономії в Індії директор Раманівського дослідницького інституту В. Радхакрішнан, син Нобелівського лауреата С. В. Рамана, в Обсерваторії УТР-2 21 липня 1983 р. (п'ятий зліва) [32]



Рис. 54. Відомий індійський фахівець у вивченні об'єктів континууму К. Р. Двараканат на семінарі в Обсерваторії УТР-2 22 травня 1991 р. (До відновлення незалежності України залишалося півроку...)



Рис. 55. Засновник низькочастотної радіоастрономії у США Б. Еріксон (п'ятий зліва) поруч із засновником низькочастотної радіоастрономії в Україні С. Я. Брауде біля радіотелескопа УТР-2 9 вересня 1994 р. [32]



Рис. 56. К. ван'т Клостер, Нідерланди, (перший ліворуч) та П. Родрігес, США, (сидить) під час експериментів з локації Сонця та Місяця на радіотелескопі УТР-2 (16 липня 1996 р.) [14]



Рис. 57. Співкерівник українсько-австрійських проектів Г. О. Рукер, Австрія, (у центрі, сидить), Б. П. Рябов (ліворуч), М. Божада, Австрія, (праворуч) під час досліджень на радіотелескопі УТР-2 (1997 р.) [14]

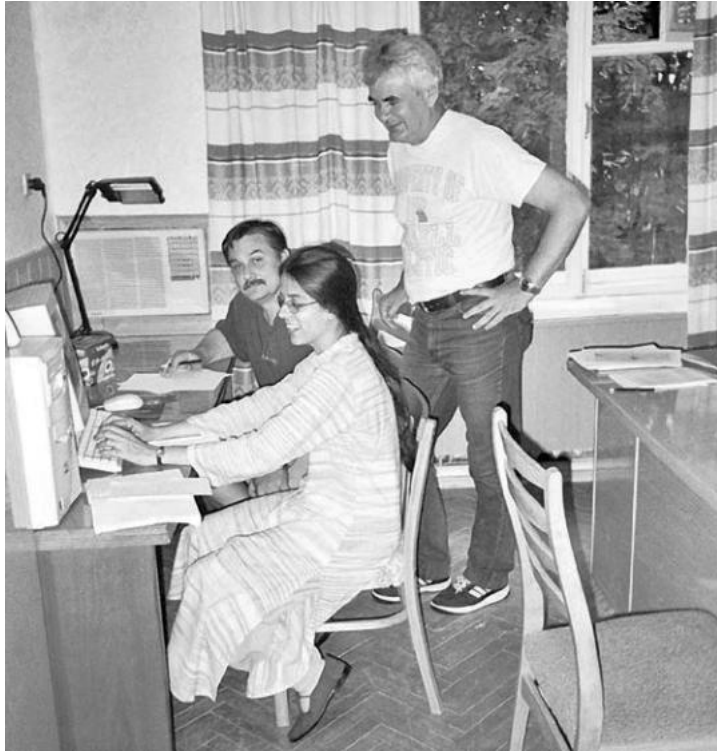


Рис. 58. Під час досліджень рекомбінаційних ліній на радіотелескопі УТР-2 у липні 2002 р. разом з Німішею Кантарією, Індія, (за комп'ютером) [14]



Рис. 59. Україно-французько-австрійсько-японський експеримент щодо пошуку екзопланет (“гарячих юпітерів”) на радіотелескопі УТР-2 (2007 р.) [14]



Рис. 60. Співкерівник україно-французьких проєктів Ф. Зарка, Франція, (третій справа) разом із колегами переймають досвід у дослідженнях на УТР-2 (2010 р.) [32]

Paris



Meudon



Nancy



Nancy (Nenu FAR)



Рис. 61. Українські радіоастрономи – співавтори створення радіотелескопа нового покоління Nenu FAR у Франції під час візиту до Паризької-Медонської-Нансі обсерваторій (червень 2015 р.) [32]



Рис. 62. Лауреати Державної премії СРСР 1977 р. Зліва направо: М. К. Шарикін, П. А. Мельяновський, А. В. Мень, Л. Г. Содін, Є. П. Коноваленко (Г. А. Інютін на фото відсутній)

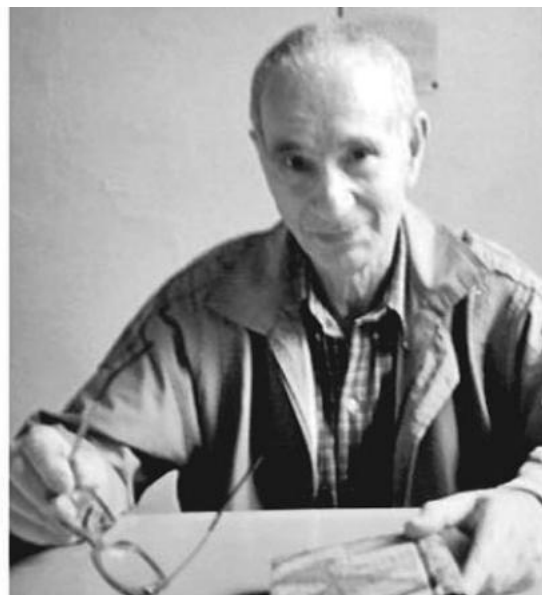


Рис. 63. Лауреати Державної премії СРСР 1988 р. О. О. Коноваленко та Л. Г. Содін (праворуч)



Рис. 64. Лауреати Державної премії України 1997 р. разом з президентом України й президентом Академії наук України. Зліва направо: Г. А. Інютін, Ю. В. Романчев, В. В. Кошовий, Президент України Л. Д. Кучма, Президент НАН України Б. С. Патон, В. Г. Булацен, В. О. Шепелєв, А. І. Браженко (С. Я. Брауде, А. В. Мень і С. Л. Рашковський на фото відсутні)



Рис. 65. Лауреати Державної премії України 2018 р. Зліва направо: С. В. Стьопкін, В. М. Мельник, О. О. Станіславський, М. М. Калініченко, О. О. Коноваленко, О. М. Ульянов, В. В. Захаренко, М. А. Сидорчук разом з президентом НАН України Борисом Євгеновичем Патоном (червень 2019 р.). Це один з останніх знімків Бориса Євгеновича, через рік його не стало...



Рис. 66. Ковиловий степ в Обсерваторії імені С. Я. Брауде



Рис. 67. Яструб на антенних елементах УТР-2



Рис. 68. Антена Схід–Захід радіотелескопа УТР-2 на заході сонця в день весняного (вгорі) та осіннього (внизу) рівнодення [32]

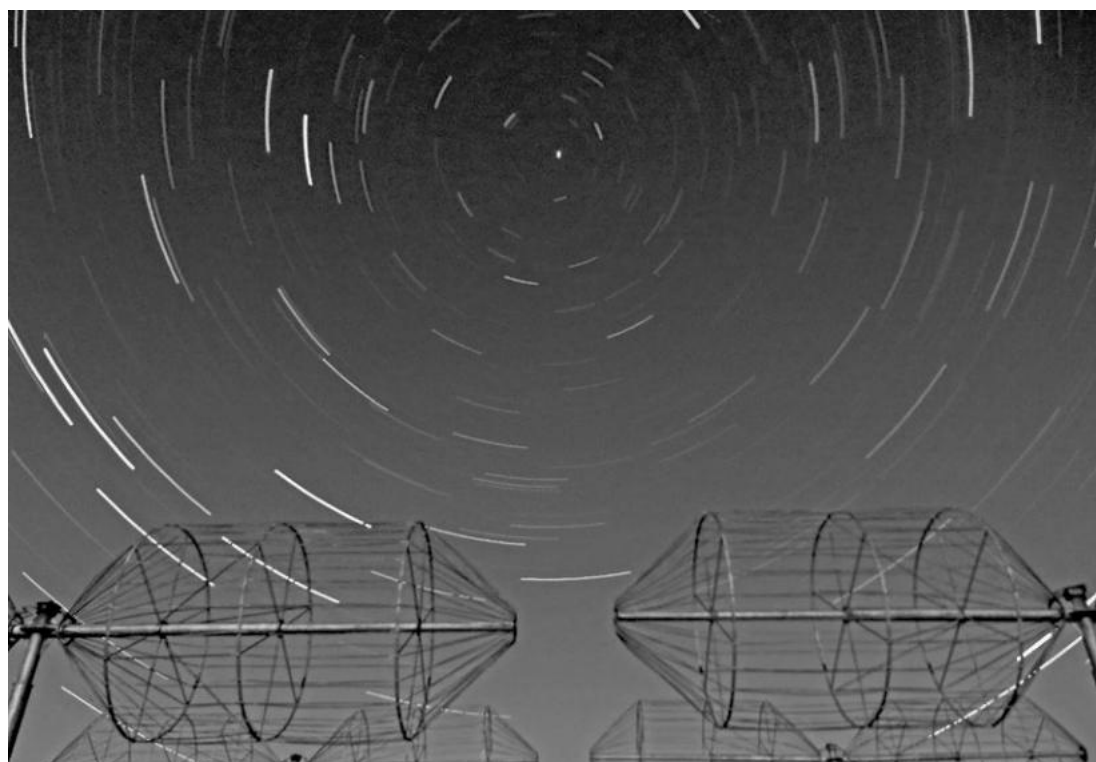


Рис. 69. Полярна зоря над антеною Північ–Південь радіотелескопа УТР-2 (час експозиції близько чотирьох годин)

нення елементів та широким діапазоном частот $8 \div 80$ МГц (втричі більшим, ніж в УТР-2 та УРАН). Забезпечуються також максимальні завадостійкість і динамічний діапазон аж до гранично низьких частот близько 8 МГц, висока чутливість та рівномірність коефіцієнту передачі в усій робочій смузі частот. Особливої уваги приділяється підвищенню якості “серця” антенної решітки – активного антенного елемента [26, 27] та фазованої антени-решітки з активними елементами в цілому [17, 28].

Значущість та актуальність вказаної роботи є очевидною і визначається наступними факторами:

- збереженням лідируючої ролі України у цій галузі фундаментальної і прикладної науки;

- великим науково-технічним потенціалом, досвідом роботи та апаратно-методичним доробком як в створенні антен, приладів, методів спостережень, так і в астрофізичних дослідженнях;

- наявністю необхідних для розміщення установок територій, що належать НАН України;

- бурхливим прогресом низькочастотної радіоастрономії у світі та тісною міжнародною співпрацею;

- забезпеченням максимальної синергії при координованому та синхронному використанні багатьох антен, рознесених на великі відстані (від одиниць до тисяч кілометрів), та мають різну архітектуру, а також однакові або суміжні діапазони хвиль;

- подальшою інтеграцією української радіоастрономії у європейський та світовий науковий простір, залученням унікальних вітчизняних радіотелескопів до кращих світових наземних та космічних радіоастрономічних мереж.

Радіотелескоп ГУРТ складається з 25-елементних активних субрешіток з аналоговим часовим фазуванням окремих субрешіток та цифровим фазуванням між ними (рис. 23–25). Системи підсилення, фазування, телекомунікацій, контролю, керування вже встановлені на 5 субрешітках (з 11 змонтованих), які використовуються у спостереженнях. Надширокосмугова цифрова система реєстрації нового покоління має різноманітні функціональні можливості, забезпечує смугу аналізу 80 МГц, кількість каналів – 16384, кількість входів – 2, частотну і часову роздільні здатності у режимі фур’є-аналізу в реальному часі – 6 кГц і 2 мс (у режимі “wave-form” – без

обмежень), розрядність АЦП – 16 біт, динамічний діапазон – 90 дБ. В останні роки в системі ГУРТ було значно покращено параметри і функціональні можливості. Впроваджено нові системи цифрового керування, включно з каналами зв’язку з головним лабораторним приміщенням УТР-2 і навіть обміном інформацією каналами Інтернет. Було покращено термостабільність, встановлено прилади оперативного контролю, забезпечено рівномірність коефіцієнта передачі і динамічного діапазона системи розподіленого підсилення нового типу. Доведено високий збіг вимірних значень параметрів ГУРТ з теоретичними розрахунками. Це відкриває новий підхід до калібрування параметрів і з’ясування абсолютних значень енергетичних параметрів випромінювання астрофізичних об’єктів. Розташування радіотелескопів УТР-2 та ГУРТ в Обсерваторії ім. С. Я. Брауде показано на рис. 26, 27.

Отже, у субрешітках ГУРТ забезпечено найкраще поєднання антенних і апаратно-реєстраційних параметрів (табл. 4.1): надширока смуга частот ($8 \div 80$ МГц); висока чутливість за антенною температурою (~ 10 дБ перевищення температури галактичного фону над температурою власних шумів); високий фактор заповнення елементів за ефективною площі однієї решітки близько 350 м^2 у центрі діапазону; високі рівномірність коефіцієнта передачі та ідентичність решіток (менше 1 дБ), а також поляризаційна розв’язка (більше 20 дБ); мінімальний рівень бічних і дифракційних пелюсток, особливо при усередненні сигналу у широкій смузі (менше 10 дБ від максимуму) при ширині діаграми спрямованості 15° у центрі діапазону; максимальний сектор електронного дискретного сканування неба променем ($\pm 90^\circ$ від зеніту) при просторовому дискреті, значно меншому ширини діаграми спрямованості ($\approx 5^\circ$); високі завадостійкість та динамічний діапазон (≥ 90 дБ у активному елементі і 16 біт у аналого-цифрових перетворювачах реєстраторів сигналів); високі часова та частотна роздільні здатності у режимі фур’є-аналізу в реальному часі.

6. Радіоастрономічна приймально-реєструюча апаратура

Окрім антенної системи, у кожному радіотелескопі виключно важливою є якість приймально-

реєструючої системи, особливо на низьких частотах, де присутні численні завади, майже відсутні у високочастотних діапазонах. Під час створення радіотелескопа УТР-2 наприкінці 60-х років приймальна система складалася з 30 лампових промислових приймачів типу Р-250М2 (“Кит”) – по 6 приймачів (частоти 10.0, 12.6, 14.7, 16.7, 20.0, 25.0 МГц) на кожен з п’яти променів діаграми спрямованості радіотелескопу (рис. 28, 29). На виходах приймачів були встановлені так звані модуляційні приставки (теж лампові), що забезпечували перемноження сигналів антен Північ–Південь та Схід–Захід, формуючи 5 “олівцевих” променів. Уся апаратура була виключно аналоговою, мала низьку чутливість, нестабільні параметри та інші недоліки, притаманні рівню радіоелектроніки тих давніх часів. Для зменшення нестабільності використовувалась імпульсна (за типом стробування) система автоматичного регулювання підсилення, що погіршувало чутливість, а модуляційний принцип перемноження зменшував удвічі час корисного спостереження.

Нижче у майже хронологічному порядку представлені основні етапи створення та вдосконалення нової радіоастрономічної апаратури – вказані приблизно роки створення і використання приладів та їх призначення, нові можливості радіоастрономічних спостережень та/або основні отримані результати з відповідними посиленнями.

1972–1973 рр. Таймер для обчислювального комплексу М-6000 – перший цифровий прилад на мікросхемах серії 133 для радіотелескопа УТР-2 (рис. 30). Він забезпечував часову синхронізацію роботи комп’ютера у реальному часі.

1973–1988 рр. 32-канальний знаковий корелометр-спектроаналізатор – перший у радянській радіоастрономії цифровий радіоастрономічний приймач [29] (рис. 30). Завдяки йому було відкрито міжзоряні спектральні лінії високозбуджених атомів на рівнях близько 600 у декаметровому діапазоні радіохвиль [30].

1975–1980 рр. Нові модуляційні радіометричні приставки на напівпровідниках та мікросхемах кількістю 50 шт. (рис. 29). Їх завданням було підвищення чутливості, стабільності, надійності, економічності під час спостережень радіоджерел континууму на УТР-2 та УРАН. Це дозволило

створити найбільш повний на декаметрових хвилях каталог позагалактичних радіоджерел [31].

1980–1990 рр. Нові радіоприймальні прилади Р-399А (“Катран”) на напівпровідниках і мікросхемах кількістю 50 шт. з додатковою розробкою систем зменшення дрейфів підсилення та розширення смуги реєстрації (рис. 29). Було забезпечено подальше підвищення чутливості, стабільності, смуги прийняття сигналів, функціональності при спостереженнях континуального та імпульсного випромінювання. В результаті було побудовано найбільш низькочастотні карти галактичного випромінювання з найвищими чутливістю та кутовою роздільною здатністю [17, 32].

1983–1990 рр. Аналого-цифровий 16-бітовий 30-канальний реєстратор для введення в ЕОМ М-6000 сигналів під час спостереження пульсарів. Використання цього реєстратора дало змогу виконати нові високоточні дослідження пульсарів.

1985–1990 рр. 4-лінійний 128-канальний знаковий корелометр-спектроаналізатор на мікросхемах серії 155 високого ступеню інтеграції. Впровадження цього приладу дозволило підвищити чутливість і роздільну здатність спостережень, скоротити час спостережень спектральних ліній у 4 рази, відкрити декаметрові рекомбінаційні лінії у багатьох галактичних об’єктах [33].

1985–2020 рр. П’ять поколінь багатоканальних цифрових корелометрів-спектроаналізаторів з прямим введенням даних у персональні комп’ютери:

а) 1024 канали, мікросхеми серії 155 високого ступеню інтеграції, частотна смуга аналізу – 1 МГц;

б) 96 каналів, спецмікросхеми К2УФ1891, частотна смуга аналізу – 10 МГц (рис. 30);

в) 128 каналів, спецмікросхеми К2УФ1891, частотна смуга аналізу – 10 МГц [34] (рис. 30);

г) 4096 каналів, спецмікросхеми Canaris, частотна смуга аналізу – 30 МГц [35] (рис. 31);

д) 32 канали (моніторинг радіозавад), мікросхеми серії 155, частотна смуга аналізу – 10 МГц [36].

Завдяки цим пристроям, насамперед 4096-канальному аналізатору, вдалося провести одночасні спостереження до 10 спектральних ліній, розширити смугу аналізу, підвищити чутливість та роздільну здатність. Це дало змогу відкрити рекордно високозбуджені міжзоряні атоми на рівнях понад 1000 [37].

1998–2008 рр. Фільтровий 60-канальний аналого-цифровий аналізатор з лінійними детекторами та високим динамічним діапазоном. Він дозволив підвищити частотну і часову роздільні здатності у широкій частотній смузі до 30 МГц з введенням інформації в ЕОМ. Це дало змогу виявити тонкі частотно-часові структури в радіовипромінюванні Сонця і пульсарів, відкрити явище аномально-інтенсивних імпульсів, побудувати карти континуального випромінювання [38, 39].

2000–2010 рр. Широкопосмугові 3- та 16-канальний аналого-цифрові реєстратори для дослідження міжпланетних мерехтінь [40] (рис. 32). Ці прилади дозволили підвищити чутливість та роздільну здатність спостережень, завдяки чому стало можливим виявити і дослідити міжпланетні мерехтіння на великих елонгаціях від Сонця, відкрити з поверхні Землі радіовипромінювання, яке генерується грозовими розрядами в атмосфері Сатурна [41, 42].

2003–2010 рр. Швидкодіючий цифровий приймач прямої реєстрації сигналів (8 біт) у смузі 2×7 МГц [43]. За допомогою цього приймача було зроблено відкриття субмілісекундних деталей радіовипромінювання від електростатичних розрядів в атмосфері Сатурна. Підвищення часової роздільної здатності до мікросекундного рівня дозволило відкрити надтонку структуру декаметрового випромінювання пульсарів.

2010–2020 рр. Аналого-цифровий 40-променевий швидкодіючий геліограф [44]. Створений для високоточних вимірювань положень і руху джерел сонячного радіовипромінювання, він дозволив вперше у світі отримати зображення радіосплесків IV типу на декаметрових хвилях [45].

2010–2020 рр. Аналого-цифровий широкопосмуговий (смуга реєстрації 200 кГц, раніше було 20 кГц) двочастотний (20 і 25 МГц) двоканальний радіоінтерферометричний приймач [46] (рис. 33). Забезпечує перетворення вхідних сигналів, оптимізує розрядність цифрування, фільтрує вузькопосмугові завади у реальному часі. Використовується для спостережень у режимі інтерферометрів на радіотелескопах УТР-2, УРАН-1, ..., УРАН-4, а також на секціях антени УТР-2 [47].

1995–2020 рр. Автоматизована система моніторингу параметрів ґрунту [48] (рис. 34). Використовується для вимірювань діелектричної про-

никності та провідності поверхні землі, знання яких дозволяє точніше з'ясувати ефективну площу антени та енергетичні характеристики космічного радіовипромінювання.

У 90-х роках для вітчизняної декаметрової радіоастрономії розпочалася ера активної міжнародної співпраці. Завдяки цій співпраці, попри важку економічну ситуацію та труднощі придбання сучасної елементної бази, вдалося досягти суттєвого прогресу у подальшому розвитку приймально-реєструючих комплексів. У процесі співпраці та за сприяння колег із Франції (Ф. Зарка, А. Лекашо, К. Розолен), Австрії (Г. Рукер), Індії (А. Дешпанде, А. Асгекар, У. Шанкар, Н. Кантарія) були встановлені та адаптовані до українських радіотелескопів цифрові спектральні приймачі, побудовані з використанням закордонної елементної бази нового покоління – надшвидких АЦП, цифрових спектральних процесорів (DSP) та програмованих матриць (FPGA).

1998–2004 рр. Двовходовий цифровий спектральний поляриметр на 1024 частотних канали розробки Франції і Австрії зі смугою частот 12 МГц та 12-бітним АЦП (рис. 35). Цей поляриметр забезпечив суттєве розширення неперервної смуги аналізу, покращення роздільної здатності, реалізацію швидкого фур'є-аналізу в реальному часі без втрати інформації та спостережного часу, що повністю підтверджено впровадженням, адаптацією та використанням аналізаторів приладів. Застосування цього приладу відкрило абсолютно новий погляд на низькочастотне радіовипромінювання Всесвіту та концепцію його досліджень, дозволило відкрити багато нових явищ у процесі вивчення Сонця, Юпітера, пульсарів, міжпланетного середовища тощо [49].

2000–2005 рр. Портативний цифровий пульсарний приймач розробки Раманівського дослідницького інституту (Індія). Він уможливив підвищення часової роздільної здатності до субмікросекундного рівня, а також відкриття декаметрового випромінювання гігантських імпульсів пульсара у Крабоподібній туманності.

2005–2020 рр. Двовходові багатоканальні цифрові приймачі з високим динамічним діапазоном DSP-Z (смуга аналізу – 33 МГц, кількість каналів – 8192, кількість входів – 2, частотна і часова роздільні здатності у режимі фур'є-аналі-

зу в реальному часі – 4 кГц і 0.25 мс, у режимі “wave-form” – без обмежень, розрядність АЦП – 16 біт, динамічний діапазон – 90 дБ), розроблені у співпраці вчених України, Франції та Японії [17, 50] (рис. 36). Вони максимально та універсально використовують та реалізують усі можливості унікальних систем УТР-2 і УРАН через пряму реєстрацію усїєї неперервної смуги частот (33 МГц) без частотного перетворення сигналу, що робить можливим ефективно вивчення континуального, монохроматичного, імпульсного, спорадичного, поляризованого, просторово-залежного космічного випромінювання. Важливим кроком вперед у подальшому розвитку апаратно-методичної ідеології використання подібних приладів у низькочастотній радіоастрономії є надширокопasmогова реєстрація сигналів (режим “wave-form”, смуга частот ≈ 30 МГц) вперше на декаметрових хвилях, зокрема, для перспективних систем апертурного синтезу та РНДБ-досліджень УТР-2 – УРАН [51]. Крім того, вперше для Т-подібних антен були реалізовані вимірювання в кожному аналізаторі двох автоспектрів потужності сигналів двох антен, а також амплітудного і фазового крос-спектру [52]. Наразі на УТР-2 встановлено 5 приймачів DSP-Z (відповідно до кількості променів) та по одному на УРАН-2 та УРАН-3. Це дозволило підвищити якість та надійність ідентифікації космічних радіосигналів різних типів. Завдяки цим приладам було виконано основний обсяг спостережень і зроблені відкриття під час вивчення декаметрового радіовипромінювання Всесвіту [17, 32, 53–58].

2010–2020 рр. Двовходові з високим динамічним діапазоном надбагатоканальні надширокопasmогові цифрові приймачі ADR (Advanced Digital Receiver, смуга аналізу – 80 МГц, кількість каналів – 16384, кількість входів – 2, частотна і часова роздільні здатності у режимі фур’є-аналізу в реальному часі – 6 кГц і 2 мс, у режимі “wave-form” – без обмежень, розрядність АЦП – 16 біт, динамічний діапазон – 90 дБ), розроблені у РІ НАН України і призначені для радіотелескопа нового покоління ГУРТ [50] (рис. 25). Комбінація параметрів цієї антени та приймачів ADR є найкращою у діапазоні $8 \div 80$ МГц, що підтверджено багатьма дослідженнями.

Одночасно зі створенням, впровадженням та освоєнням вказаної вище апаратури відбувалася розробка програмного забезпечення для багатьох поколінь обчислювальної техніки та носіїв інформації. Це стосується встановлення на початку 70-х років ЕОМ “Промінь” на транзисторах, потім – обчислювально-керуючого комплексу АСВТ М-6000, рис. 37, (ЕОМ 3-го покоління на мікросхемах серії 155), комплексів СМ-2М, МЕРА-КАМАК і нарешті – великої кількості сучасних потужних персональних комп’ютерів. Носії інформації також перманентно і прогресивно змінювались – від чорнильних стрічок, перфострічок, магнітних стрічок і дисків до багатотерабайтних жорстких дисків. Розвиток інформаційних, комп’ютерних і телекомунікаційних технологій є дуже важливим у низькочастотній радіоастрономії, оскільки є потреба у реєстрації, архівації, обробці і передачі надвеликих обсягів первинних даних спостережної інформації, а з іншого боку, ці технології досить просто та природньо впроваджуються саме в низькочастотну радіоастрономію.

На рис. 38 зображені старий (до 2008 р.) та новий апаратні зали УТР-2. Порівняно з попередньою сучасна приймально-реєструюча апаратура не лише значно компактніша та більш енергозберігаюча, але і забезпечує у тисячі разів більший обсяг наукової інформації. Головні параметри реєстраторів DSP-Z (УТР-2, УРАН) та ADR (ГУРТ) наведені у табл. 6.1.

Велика кількість апаратно-методичних розробок, представлених вище, зумовлена появою нових астрофізичних задач. Ці складні задачі потребують нових адекватних приладів, оскільки збільшуються набір і необхідна точність вимірювання характеристик космічного радіовипромінювання, що потребує покращення усіх параметрів експериментів з урахуванням відомих (і поки що невідомих) негативних впливів. Це покращення параметрів підштовхується і стимулюється постійним прогресом електронної, цифрової та комп’ютерної техніки. Комплексний, багатобічний, циклічний підхід до досліджень (постановка астрофізичної задачі – постановка апаратної задачі – розробка апаратури – спостереження – обробка даних – астрофізична інтерпретація – постановка нової задачі) зумовлює певний сталий успіх у вирішенні актуальних

Таблиця 6.1. Параметри реєстраторів DSP-Z (УТР-2, УРАН) та ADR (ГУРТ)

Параметри	DSPZ	ADR
Частотний діапазон, МГц	33	80
Кількість частотних каналів	8192	16384
Роздільна здатність за частотою, кГц	4	6
Роздільна здатність за часом, мс	0.5	2
Роздільна здатність АЦП, біт	16	16
Динамічний діапазон, дБ	90	90
Кількість вхідних каналів	2	2
Можливості обробки в реальному часі		
Швидке перетворення Фур'є	так	так
Запис сигналу "wave-form" (необмежена роздільна здатність)	так	так
Власний та комплексний крос-спектр	так	так
Режим суми та різниці сигналів	ні	так
Нормування сигналів	ні	так
Затримка сигналів	ні	так

і складних астрофізичних задач для вивчення Всесвіту методами низькочастотної радіоастрономії.

Описане вище обладнання, особливо те, що розроблене в останні роки, дозволило отримати величезну кількість пріоритетних астрофізичних результатів. Здебільшого результати обробки спостережень наводяться як динамічні спектри (тривимірні зображення частота – час – інтенсивність радіовипромінювання) та просторові тривимірні карти (пряме сходження – схилення – інтенсивність). Деякі зображення наводяться у цьому огляді (рис. 39–45), а також у роботі [32] і в сотнях робіт авторів цього огляду, опублікованих у виданнях з найвищим імпаکت-фактором і мають високий індекс цитування.

7. Методи спостережень у низькочастотній радіоастрономії

Як зазначалося вище, при створенні інструментів для низькочастотної радіоастрономії і проведенні відповідних спостережень доводиться стикатися зі значними апаратно-методичними і радіофізичними проблемами. Нижче перераховані ці проблеми, а також вказані науково-технічні вимоги до антен, апаратури і методів спостережень, які усувають або зменшують вплив відповідних проблем:

1. Висока яскравісна температура галактичного фону. Вимоги:

– велика ефективна площа радіотелескопа ($10^4 \div 10^6 \text{ м}^2$);

– велика спостережна статистика;
– збільшення ефективних смуги реєстрації та часу накопичення;
– багатоантенні спостереження.

2. Земні завади (природні, штучні, вузько-смугові, широкосмугові, зовнішні, внутрішні). Вимоги:

– велика ефективна площа антен, висока спрямованість, малий рівень бічних пелюсток;
– висока якість заповнення UV-площини;
– розрахунки і знання параметрів антен, знання параметрів завад та їх регулярний моніторинг;
– високий динамічний діапазон антенного підсилення та інших антенних вузлів;

– високі динамічний діапазон, частотна і часова роздільні здатності реєструючої апаратури;

– широкосмугова антена;

– багатопробленеві спостереження (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);

– велика спостережна статистика та повторюваність результатів, реалізація високого відношення сигнал/шум (> 5);

– позаіоносферні спостереження, а також спостереження на зворотному боці Місяця;

– багатоантенні спостереження.

3. Вплив іоносфери (рефракція, мерехтіння, поглинання). Вимоги:

– висока спрямованість антен, великі площа, смуга частот, поле зору, багатопробленевість, ON-OFF режими, картографування;

– висока якість заповнення UV-площини;

– знання параметрів іоносфери та її моніторинг;

– урахування часу і сезону спостережень;

– спеціальна обробка (очищення, фільтрація, пошук ознак корисних сигналів у нестационарних умовах, розпізнавання образів);

– велика спостережна статистика і повторюваність результатів, реалізація високого відношення сигнал/шум (> 5);

- позаіоносферні спостереження, а також спостереження на зворотному боці Місяця;
- багатоантенні спостереження.

4. Низька кутова роздільна здатність одного радіотелескопа. Вимоги:

- великі лінійні розміри радіотелескопа та його оптимальна конфігурація;
- багатоантенні спостереження, позаіоносферні спостереження (радіоінтерферометрія в режимах Земля–Земля, Земля–Космос, Космос–Космос).

Вимоги були детально сформульовані та поступово реалізовані протягом останніх 50 років під час створення і модернізації радіотелескопів УТР-2, УРАН, ГУРТ і приймально-реєструючих комплексів, описаних у попередніх підрозділах. Нижче наведені деякі нові методичні підходи, які значно покращують можливості низькочастотних досліджень [17, 32].

7.1. Багатоантенні спостереження

За останніх років було показано, що одним із найрадикальніших шляхів зменшення 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”). Ідея полягає в тому, що у різних географічних пунктах параметри іоносфери, а також завадових сигналів істотно відрізняються. Тому синхронні спостереження одних і тих самих астрофізичних об’єктів і порівняння відповідних динамічних спектрів дозволяють виділити особливості в спектрах, які не співпадають. Ця розбіжність зумовлена тим, що короточасні сплески випромінювання (дуже “схожі” на корисні сигнали) майже завжди визначаються іоносферними мерехтіннями, які дуже відрізняються навіть на відстанях у десятки кілометрів. Водночас, коли подібні сплески співпадають, з цілковитою впевненістю можна стверджувати, що вони виникають в об’єктах далекого космосу. Подібна ідентифікація корисних та вузько- і ширококутових радіозавадових сигналів можлива також шляхом порівняння спектрів, синхронно виміряних в рознесених

пунктах. Було показано, що для надійної ідентифікації слабких спорадичних сигналів (активних зірки, гама-сплески, транзйенти) тільки багатоантенні спостереження можуть довести астрофізичну природу зареєстрованих сигналів.

Останнім часом були проведені успішні спостереження радіовипромінювання Сонця [38], Юпітера [49, 55], Сатурна, пульсарів, екзопланет та інших астрофізичних об’єктів за допомогою радіотелескопів УТР-2, УРАН, ГУРТ (Україна), NDA, Nenu FAR (Франція), LOFAR (Нідерланди), LWA (США) та інших інструментів [32] (рис. 46, 47). Розташування низькочастотних радіотелескопів у Європі показано на рис. 48.

Найбільша в світі база (відстань) низькочастотних багатоантенних спостережень між Україною та США складала близько 8000 км (нагадаємо, що діаметр Землі дорівнює 12000 км). За такої умови було не тільки досягнуто суттєве покращення ефективності і надійності експериментів, але й детектовано нове явище – променева структура S-випромінювання Юпітера [59].

Українські радіоастрономи запропонували ще один варіант багатоантенної синергії. Йдеться про синхронні спостереження не лише на віддалених антенах в однакових діапазонах хвиль, але і на антенах, що мають неспівпадаючі діапазони. В першу чергу, це корисно під час вивчення змінного у часі космічного випромінювання пульсарів, активних зірок, Сонця, транзйентів, ядер галактик і квазарів.

7.2. Наземно-космічна радіоастрономія

Як відомо, космічне радіовипромінювання на частотах нижче 10 МГц поверхні Землі не досягає. Це зумовлено екранувальним впливом (поглинанням) іоносфери на висотах 100÷200 км. Тому практично з самого початку космічної ери близько 60 років тому на багатьох космічних апаратах встановлювались низькочастотні антени. Перебуваючи вище земної іоносфери, ці прилади були спроможними прийняти космічне радіовипромінювання на частотах нижче 10 МГц і навіть до десятків кілогерц. Цікаво, що першим, хто передбачив таку позитивну можливість наднизькочастотної радіоастрономії (через рік після запуску першого супутника), був видатний астрофізик І. С. Шкловський (1916–1985). Він народився у м. Глухові Сумської області, і в

2016 р. астрономічна спільнота України і світу відзначала його 100-річний ювілей [60].

Останніми роками у Європі (ESA) та США (NASA) були реалізовані спеціальні космічні місії з низькочастотними радіоприладами (Galileo, Ulysses, WIND, Cassini, STEREO, Juno та ін.). Однак у цих проектах був очевидний недолік. Оскільки на космічному апараті можливо встановити лише малу антену (всього один диполь), відповідні вимірювання мали дуже низьку чутливість і багато важливих астрофізичних явищ залишались невивченими, або сумнівними. Однак українські радіоастрономи запропонували новий методичний підхід – низькочастотну наземно-космічну радіоастрономію. Реалізуються синхронні (як описано в попередньому розділі) експерименти на космічних апаратах і за допомогою найбільших наземних низькочастотних радіотелескопів, серед яких виділяються українські інструменти [61, 62]. Чутливість УТР-2 у тисячі разів вища, ніж у космічних приладів, а необхідна смуга частот з найвищими частотною і часовою роздільними здатностями реалізується тільки на Землі. Крім того, є впевнене покриття діапазонів частот, $8 \div 33$ МГц (УТР-2) та $1 \div 30$ МГц (космічні телескопи), що забезпечує надійну “зшивку” і відповідний сумісний аналіз динамічних спектрів. Такий режим суттєво підвищує ефективність низькочастотних експериментів. Це підтверджено багатьма наземно-космічними вимірюваннями за допомогою УТР-2, УРАН, ГУРТ й інших радіотелескопів і космічних місій WIND, Cassini, STEREO (рис. 49). Зокрема, завдяки синхронним спостереженням на радіотелескопі УТР-2 і на автоматичній міжпланетній станції Cassini (остання до серпня 2017 р. перебувала на орбіті навколо Сатурна) вдалося надійно зареєструвати радіосигнали від блискавок у атмосфері планети-гіганта. У зв’язку із завершенням місії у 2017 р. наземні дослідження цього явища на українських радіотелескопах будуть особливо цінними у майбутні десятиліття. Важливі результати були отримані в процесі синхронних досліджень на УТР-2, УРАН, ГУРТ і місії STEREO [63]. Через поломку одного з двох апаратів STEREO, які працювали у стереоскопічному режимі, лише наземна синхронна підтримка місії збереже такий режим. У 2016 р.

була розпочата дуже важлива юпітеріанська місія Juno, до наземної підтримки якої офіційно залучені радіотелескопи УТР-2, УРАН, ГУРТ.

Вже багато років українські радіоастрономи беруть участь у підготовці незвичайних космічних проектів – створенні низькочастотних (кілометровий – гектаметровий – декаметровий діапазони) радіоастрономічних систем на зворотному боці Місяця, де існують унікальні, вельми сприятливі умови для спостережень завдяки цілковитій відсутності плазмового шару (іоносфери), а також повному екрануванню усіх типів радіозавад від Землі (зворотний бік Місяця ніколи не повертається до нашої планети). В рамках однієї з нових подібних місячних місій FarSide Explorer наразі розробляються наукові пропозиції та технічні вимоги, а також методи наземної підтримки спостережень, включно з використанням радіотелескопів УТР-2, УРАН та ГУРТ [64]. Крім того, у рамках виконання Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2018–2022 рр. аналізується можливість створення місячної наукової бази за участю ДКБ “Південне”, РІ НАН України та інших установ [65].

7.3. Використання малорозмірних низькочастотних радіотелескопів нового покоління

Українські радіотелескопи працюють практично безперервно, що важливо для комплексних досліджень Всесвіту за багатьма програмами підвищення надійності та інформативності експериментів, для збільшення спостережної статистики. Організація таких робіт на велетенських наукових установках є непростю задачею з огляду на людські ресурси, складності експлуатації приладів, їх ремонт, а також енерговитрати. Проведено великі розробки для суттєвого підвищення рівня автоматизації усіх функцій інструментів, включно з дистанційним доступом до керування технікою з використанням каналів Інтернету.

В процесі створення і експлуатації радіотелескопа ГУРТ (навіть однієї 25-елементної субрешітки) виявилися неочікувані позитивні обставини. Було з’ясовано, що порівняно мала, але якісна антена нового покоління є високо-ефективним та інформативним інструментом

для вивчення багатьох об'єктів і явищ: Сонця, планет, міжпланетного середовища, міжзоряного середовища і спектральних ліній, галактичного і метagalacticного фону, пульсарів, космологічних ефектів. Широкі можливості використання субрешіток ГУРТ визначаються, зокрема, надширокою смугою частот антен і систем реєстрації; високою чутливістю за яскравістю температурою; завадостійкістю; рівномірністю коефіцієнта передачі; електронним скануванням неба; поляриметричними можливостями; високим фактором заповнення елементів; моніторингом параметрів ґрунту, завад, стану іоносфери; хорошим збігом теоретичних розрахунків параметрів антен та експериментів; високим ступенем автоматизації; розвиненим програмним забезпеченням; надійністю; простотою експлуатації; економічністю; екологічною безпекою [66].

Наразі субрешітки ГУРТ працюють у різних режимах і за різними науковими програмами, включно з синхронними спостереженнями на радіотелескопі УТР-2 та інших інструментах наземного і космічного базування (рис. 50).

8. Міжнародна співпраця і роль України у розвитку низькочастотної радіоастрономії

Міжнародна співпраця України у галузі низькочастотної радіоастрономії має давню історію. Ще у 70–80 роки Радіоастрономічну обсерваторію УТР-2 відвідували багато видатних радіоастрономів: К. Келлерман, Б. Еріксон, Р. Перлі (США); О. Слі, Д. Мелроуз, К. Міллс (Австралія); В. Радхакрішнан, К. Антарамаях (Індія); І. Шкловський, М. Кардашов, Ю. Парійський (СРСР) та ін. Гігантський радіотелескоп УТР-2 дуже цікавив наукову спільноту, зокрема і тому, що в радянські часи ця унікальна наукова установа була створена суто для фундаментальних досліджень, а не для ВПК, крім того, була побудована лише за кошти Академії наук України. З іншого боку, у ті далекі часи не всі фахівці були впевнені у перспективах відповідних дуже низькочастотних досліджень. Однак крок за кроком українські радіоастрономи доводили, що низькочастотна радіоастрономія є вельми перспективною наукою, особливо якщо правильно реалізувати, оптимізувати та об'єднати антенні, апаратно-методичні та астрофізичні підходи.

Поступово закордонні фахівці визнавали правильність таких підходів, переймали вітчизняний досвід в усіх аспектах діяльності у галузі низькочастотної радіоастрономії, все більше цікавились українськими дослідженнями і активно виявляли прагнення до тісної співпраці.

На жаль, у часи “залізної завіси” міжнародні контакти українських вчених були вкрай обмеженими. Багато ґрунтовних робіт вітчизняних радіоастрономів 1960–1970 рр., наприклад, [10–12], були практично невідомими за кордоном. Видатний вчений С. Я. Брауде лише двічі їздив у закордонні відрядження до Польщі та Чехословаччини у 60-ті роки. Він щиро радів, коли з отриманням Україною незалежності всі радіоастрономи нового покоління почали брати активну участь у міжнародній співпраці, включно з численними взаємними візитами науковців.

Вже у вересні 1991 р. українські радіоастрономи за ініціативою академіка НАН України Я. С. Яцківа були запрошені до м. Грац (Австрія) в Інститут космічних досліджень, де була невелика радіообсерваторія, для участі у міжнародній конференції “Планетна і сонячна радіоemisія III”. Це, по суті справи, було першим кроком у довготривалій і плідній співпраці України з провідними радіоастрономічними установами Європи та багатьох країн світу. У 2021 р. відбудеться рівно 30 років з початку цієї важливої діяльності.

Спільні дослідження за своєю структурою полягали у наступному:

- постановка нових астрофізичних задач;
- розробка приймально-ресруючих приладів нового покоління у закордонних установах;
- встановлення і адаптація нових приладів на найбільших у світі українських радіотелескопах;
- довготривалі комплексні радіоастрономічні спостереження;
- обробка та архівація великих обсягів спостережних даних з використанням ГРІД-кластерів;
- передача даних, зокрема, за допомогою мобільного та кабельного Інтернета;
- створення баз експериментальних даних у вітчизняних і закордонних установах;
- астрофізична і теоретична інтерпретація отриманих результатів;
- підготовка спільних наукових публікацій;
- підготовка спільних проектів, нарад, участь у міжнародних конференціях;

– консультація і передача досвіду у галузях створення радіоастрономічних антен, апаратури, методів, спостережень, обробки даних, астрофізики.

Нижче наведено перелік країн, з якими Україна найактивніше співпрацює у галузі низькочастотної радіоастрономії, а також головні наукові тематики цієї співпраці:

– Франція (антени, апаратура, методи, спостереження, обробка даних спостережень Юпітера, спільні спостереження з NDA, LOFAR, NenuFAR та космічними місіями для досліджень Сатурна, Сонця, екзопланет, пульсарів, транзієнтів);

– Австрія (антени, апаратура, бази даних, обробка, планети, Сонце, спільні спостереження з NDA та космічними місіями);

– Німеччина (Сонце, спільні спостереження з LOFAR, AIP);

– Нідерланди (Юпітер, екзопланети, пульсари, Сонце, Місяць, міжпланетне середовище, спільні спостереження з LOFAR);

– Індія (пульсари, радіорекомбінаційні лінії);

– Бельгія (Сонце, теорія випромінювання);

– Велика Британія (Сонце, теорія випромінювання);

– Ірландія (Сонце, спільні спостереження з LOFAR);

– США (Юпітер, спільні спостереження з LWA);

– Японія (апаратура, методи, обробка даних, спільні спостереження з NDA, LOFAR, NenuFAR, космічними місіями).

Слід підкреслити взаємоприйнятний, справедливий та відкритий характер співпраці з усіма країнами-партнерами. Так, у Франції та Австрії розробили спеціально для України потужні цифрові реєстратори на найновішій елементній базі, недоступній в Україні. Це були цифрові реєстратори DSP (2 шт.), ROBIN (1 шт.), DSP-Z (2 шт.), акустооптичний аналізатор (1 шт.), аналізатор Hewlett-Packard (1 шт.), пульсарний приймач (1 шт.), персональні та спеціальні комп'ютери (3 шт.), аналогові вхідні приймачі з комп'ютерним керуванням (2 шт.), носії інформації на жорстких дисках (10 шт.). Загальна вартість вказаного обладнання складала близько одного мільйона євро. Колеги з Індії передали в Україну для спільних досліджень швидкодіючий цифровий пульсарний приймач, а американські радіоастрономи – комплект найкращих на початок

90-х років спеціальних мікросхем кореляторів. Крім того, протягом останніх десятиліть закордонні партнери забезпечили понад 100 поїздок українських фахівців для участі у нарадах, конференціях, спостереженнях, обробці даних, підготовці спільних публікацій. На це витрачено декілька сотень тисяч євро. Зі свого боку, українські радіоастрономи встановили та адаптували коштовне закордонне обладнання на найбільші в світі українські радіотелескопи УТР-2, УРАН, ГУРТ, забезпечили левову частку складних спостережень, обробки і передачі даних, астрофізичної інтерпретації результатів. Наразі опубліковано понад 100 спільних статей в авторитетних виданнях і зроблено стільки ж доповідей на міжнародних конференціях. Добре відомо, що у зв'язку з великими проблемами нашої країни багато науковців їздять за кордон для досліджень на кращих наукових установках. У галузі ж низькочастотної радіоастрономії має місце протилежна ситуація. Тобто завдяки унікальним параметрам українських радіотелескопів, величезному радіоастрономічному потенціалу та досвіду співробітників РІ НАН України та їх гостинності саме закордонні радіоастрономи часто та охоче приїздять на радіотелескопи УТР-2, УРАН, ГУРТ для спільних експериментів та досліджень (рис. 51–60).

Особливо слід відзначити міжнародне визнання того, що українські інструменти та відповідні дослідження є прекурсором нових світових досліджень у галузі низькочастотної радіоастрономії. Не випадково, що українські фахівці офіційно залучені до створення нового радіотелескопу NenuFAR у Франції (рис. 61), вже подано запит на виконання проекту зі створення субрешіток ГУРТ у Австрії, є пропозиції щодо виконання подібних робіт і в інших країнах. Слід відзначити також численні запрошення українських радіотелескопів та фахівців до офіційної участі в багатоантенних наземних і наземно-космічних мережах радіотелескопів і міжнародних дослідженнях.

9. Висновки

Радіоастрономічні антени, приймально-реєструюча апаратура, методи спостережень, створені протягом останнього півстоліття і описані вище, дозволили виконати широкомасштабні дослід-

ження низькочастотного радіовипромінювання об'єктів Всесвіту. Високі параметри систем уможливили отримання безлічі пріоритетних астрофізичних результатів і наукових відкриттів, які будуть представлені у наступних статтях, присвячених 110-й річниці від дня народження С. Я Брауде. Несподіваною виявилась величезна кількість типів об'єктів та явищ, що стали доступними для виявлення і вивчення методами декаметрової–метрової радіоастрономії (див. табл. 9.1). Вдалося зареєструвати і пояснити особливості усіх відомих механізмів космічного радіовипромінювання: нетеплового синхротронного радіовипромінювання, випромінювання при поширенні заряджених частинок та хвиль у магнітоактивній плазмі, теплового випромінювання нагрітої плазми та поглинання цієї плазмою нетеплового фонового випромінювання. Були також відкриті принципово нові механізми радіовипромінювання – сигнали, що виникають під час електростатичних розрядів, та монохроматичне поглинання при квантових переходах між рівнями надзбуджених міжзоряних атомів.

Переважну більшість результатів отримано за допомогою автономного використання УТР-2 – інструмента з рекордною чутливістю, коли надвисока кутова роздільна здатність є другорядним параметром. Суттєвим додатком був режим багатоантенної синергії (особливо для змінних у часі явищ) з координованим використанням радіотелескопів УТР-2, УРАН-1, ..., УРАН-4, ГУРТ, а також закордонних інструментів наземного та космічного базування. Тонка просторова структура певної вибірки радіоґалактик і квазарів, а також деяких галактичних об'єктів унікальним чином вивчається РНДБ-системою УРАН. Слід наголосити на тому, що високоякісне незалежне картографування на частотах нижчих за 30 МГц (як то проводиться методами РНДБ, наприклад, на сантиметрових хвилях) є вкрай проблемним. Це зумовлено дуже великим негативним впливом середовища поширення радіохвиль, перш за все іоносфери на низьких частотах. Такий вплив руйнує взаємну фазу сигналів (фазу комплексного крос-спектра), що приймаються антенами на великих відстанях одна від одної. Однак запропонований в Україні метод вимірювань амплітудних крос-спектрів для РНДБ з використанням

Таблиця 9.1. Об'єкти, що спостерігаються за допомогою українських радіотелескопів, та успіхи в отриманні нових результатів

Земля, Місяць	Іоносфера	+
	Магнітосфера	~
	Атмосферні зливи космічних променів	+
	Параметри поверхні Місяць:	+
	покриття	+
	затемнення	+
	радар	+
	вторинна емісія	-
Сонячна система	Сонце:	
	спокійне	+
	активне	+
	радар	-
	Юпітер	+
	Планети (Сатурн)	+
	Міжпланетне середовище:	
	мерехтіння	+
РНДБ	+	
рекомбінаційні лінії	~	
Комети	~	
Галактика	Пульсари	+
	Активні зірки	~
	Екзопланети	-
	Транзйенти	+
	Нетепловий фон	+
	Залишки наднових	+
	Області НІІ	+
	Міжзоряне середовище (рекомбінаційні лінії)	+
Метагалактика	Метагалактичний фон	+
	Галактики	+
	Радіоґалактики	+
	Квазари	+
	Чорні дірки	~
	Скупчення ґалактик	+
	Неідентифіковані об'єкти	+
	Транзйенти	-

Примітка. Позначка "+" – надійно зареєстровано велику кількість об'єктів та/або явищ; "~" – є невелика кількість позитивних спостережень, що потребують підтвердження; "-" – позитивних результатів поки що немає, пошук продовжується.

високочастотних карт є вельми інформативним. У світі існує дуже велика база даних, що містить високочастотні зображення галактичних та позагалактичних об'єктів. Зрештою однією з головних переваг низькочастотної радіоастрономії є саме можливість з'ясування різниці між астрофізичними структурами тих самих об'єктів на

низьких і високих частотах, що і дає унікальна система УРАН. Крім того, ця система дає можливість постановки нової задачі пошуку компактних пульсароподібних джерел з нетепловим неперервним або спорадичним низькочастотним радіовипромінюванням з рекордною чутливістю, оскільки вимірювання модуля крос-спектру практично не обмежується інтервалами інтегрування за часом і частотою.

Підсумовуючи вищевикладене, сформулюємо головні результати півстолітньої діяльності у галузі апаратно-методичних розробок для низькочастотної радіоастрономії.

1. Розроблено та впроваджено нові системи та елементи найбільших в світі українських радіотелескопів декаметрових хвиль УТР-2, УРАН-1, ..., УРАН-4. Нові широкосмугові високочутливі завадостійкі системи антенного підсилення повністю реалізують унікальні параметри та можливості вітчизняних радіотелескопів та забезпечують неперервну смугу частот від 8 до 33 МГц (або від 8 до 40 МГц), сумарну ефективну площу до 200000 м² при кількості елементів 4000, просторову роздільну здатність від 20' (УТР-2) до 3" (РНДБ режим УТР-2 + УРАН).

2. Створено та впроваджено радіотелескоп нового покоління ГУРТ. За своїми головними характеристиками: діапазон частот (8 ÷ 80 МГц), чутливість (перевищення фону Галактики над власними шумами близько 10 дБ), динамічний діапазон (> 90 дБ/мкВ), завадостійкість (запас за рівнем реальних завад > 20 дБ), рівномірність коефіцієнта передачі (< 1 дБ), ідентичність поляризаційних каналів (< 1 дБ), ідентичність субрешіток решітки (< 1 дБ), – він перевершує закордонні аналоги.

3. Розроблено та впроваджено декілька поколінь аналогової та цифрової приймально-реєструючої апаратури з прогресивним покращенням усіх параметрів та функціональних можливостей. Сучасні універсальні багатофункціональні реєстратори мають смугу аналізу 33 МГц, кількість частотних каналів – 8192, частотну і часову роздільні здатності – 4 кГц та 0.5 мс відповідно, динамічний діапазон – 90 дБ (DSP-Z). Реєстратори АDR (ГУРТ) мають смугу аналізу 80 МГц за кількістю каналів 16384. Комбінація параметрів українських радіотелескопічних антен і апаратури є найкращою се-

ред світових низькочастотних радіотелескопів, особливо на частотах нижче 30 МГц, найбільш цікавих для низькочастотної астрофізики.

4. Розроблено та впроваджено нові методи і засоби спостережень для вивчення і надійної ідентифікації на тлі природних і штучних завад континуального, монохроматичного, імпульсного, спорадичного, поляризованого, просторово-залежного низькочастотного космічного випромінювання. До цих методів належать багатопроменеві, багатосекційні, багатоантенні та наземно-космічні спостереження, включно з використанням малорозмірних радіотелескопів нового покоління. Забезпечено адаптацію систем реєстрації, обробки, архівації, передачі даних і управління радіотелескопами до сучасних телекомунікаційних та інформаційних технологій з використанням ГРІД-кластерів.

5. Створення та розвиток радіоастрономічної експериментальної бази, відповідні дослідження та спостереження високо оцінені державними і відомчими нагородами впродовж останнього півстоліття. За створення радіотелескопа УТР-2 і антен для зв'язку в 1977 р. присуджена Державна премія СРСР (рис. 62). В 1988 р. присуджена друга Державна премія СРСР за відкриття ліній високочастотних міжзоряних атомів за допомогою УТР-2 (рис. 63). Жоден з інших радіотелескопів колишнього СРСР, яких було більше 10, не був відзначений так високо. Вже в незалежній Україні в 1997 р. присуджена Державна премія України за створення системи УРАН (рис. 64), а в 2019 р. – за працю “Радіовипромінювання Всесвіту на декаметрових хвилях” (рис. 65). Близько 20 років тому українські радіотелескопи було включено до Державного реєстру об'єктів наукового національного надбання країни. Починаючи з 2006 р. відповідні праці підтримуються Цільовою програмою НАН України, що головним чином дозволило забезпечити суттєвий науково-технічний інноваційний прогрес. Українські радіотелескопи і досягнення українських радіоастрономів добре відомі у науковому світі, є незамінними і максимально затребуваними міжнародною радіоастрономічною спільнотою.

6. 50-річний досвід, результати та досягнення вітчизняної довгохвильової радіоастрономії повністю довели можливість створення високо-

ефективної експериментальної бази – надчутливих, ширококутових, електронно керованих, високороздільних, завадостійких, багатофункціональних гігантських радіотелескопів декаметрового–метрового діапазонів хвиль. Показано, що, попри негативні фактори, притаманні саме низькочастотній радіоастрономії, запропоновані апаратно-методичні підходи дозволяють отримувати унікальну астрофізичну інформацію, недоступну іншими методами астрономії. Світовий прогрес низькочастотної радіоастрономії, що ґрунтується на створенні багатьох сучасних радіотелескопів, зокрема за участю українських фахівців, підтверджує чудові можливості та перспективи розвитку цього актуального напрямку фундаментальної науки.

7. Радіоастрономічна обсерваторія імені С. Я. Брауде фактично стала світовим центром низькочастотної радіоастрономії декаметрових–метрових хвиль. Тут зосереджені вельми потужні експериментальні засоби, проводяться комплексні спостереження та дослідження майже всіх типів астрофізичних об'єктів і явищ, отримується лівова частка відповідних астрофізичних та апаратно-методичних результатів, забезпечується активна міжнародна співпраця. Крім того, територія обсерваторії (близько 140 га) є своєрідним заповідником лісостепової зони нашої країни, де спостерігаються не тільки радіоастрономічні, але й інші астрономічні та природні явища (рис. 66–69).

Вже майже 18 років Семена Яковича Брауде немає з нами. До останніх днів свого довгого життя він жваво цікавився подіями і обговорював останні віяння у вітчизняній і світовій радіоастрономії. Він миттєво реагував на усе нове і підтримував ідеї, які формулювалися та реалізовувалися у процесі модернізації існуючої техніки, а також під час створення нових систем. Природньо, глобальний та локальний прогрес комп'ютерної і цифрової техніки, інформаційних і телекомунікаційних технологій, розвиток теорії і техніки радіоастрономічних антен та приймальних засобів випереджають найсміливіші прогнози та очікування. Зрозуміло, що багато з цього Семен Якович не зміг застати і побачити. Наступні покоління послідовників завжди будуть пам'ятати і продовжувати його справу, вдосконалювати відповідну техніку і підтримувати науко-

ву “планку”, яку він встановив свого часу вельми високо та надійно [67].

Радіоастрономічні розробки і дослідження, описанні вище, проводилися у процесі виконання проектів фундаментальних досліджень, цільових програм, конкурсної тематики НАН України, а також інших вітчизняних та міжнародних грантів, проектів і програм.

Автори огляду вдячні багатьом поколінням співробітників ІРЕ НАН України, РІ НАН України та інших установ, які брали участь у створенні, використанні та обслуговуванні українських радіотелескопів. Вказана півстолітня діяльність була б неможливою без постійної підтримки Президента НАН України Б. Є. Патона, а також академіків А. Г. Наумовця, А. Г. Загороднього, В. Л. Богданова, В. Г. Бар'яхтара, М. С. Бродіна, В. М. Локтева і всього керівництва нашої Академії. Наступні покоління науковців завжди пам'ятатимуть першопрохідців та ентузіастів низькочастотної радіоастрономії С. Я. Брауде, А. В. Меня, Л. Г. Содіна, Л. Л. Базеляна, С. Л. Рашковського, Е. П. Абраніна, М. К. Шарикіна, В. В. Кримкіна, М. Ю. Гончарова, Б. П. Рябова, Г. А. Інютіна, Б. Ю. Устименка, І. С. Фальковича, В. Ф. Кулішенка, Е. П. Коноваленка, І. М. Жука, П. А. Мельяновського та багатьох інших науковців, інженерів і техніків.

Описані дослідження виконувалися в рамках держбюджетних тем НАН України: “Радіовипромінювання Всесвіту у декаметровому діапазоні хвиль”, “Дослідження сонячної корони радіоастрономічними методами на декаметрових хвилях”, “Розробка та впровадження елементів і систем великих декаметрових антен”, “Дослідження структури космічних радіоджерел в широкій смузі частот за допомогою мережі декаметрових інтерферометрів УРАН”, – а також конкурсної договірної науково-дослідницької роботи “Нові горизонти вітчизняної та міжнародної низькочастотної радіоастрономії”, Цільової комплексної програми НАН України “Інструментальне та інформаційне приєднання радіотелескопів УТР-2, УРАН, ГУРТ до світових мереж низькочастотної радіоастрономії”, Цільової комплексної програми НАН

України з наукових космічних досліджень на 2018–2022 рр. (проекти “Наземний супровід системою низькочастотних радіотелескопів УТР-2 – УРАН – ГУРТ міжнародних та українських космічних місій” та “Створення низькочастотних радіоастрономічних елементів і систем для досліджень об’єктів Всесвіту з поверхні Місяця”).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Брауде С. Я., Мень А. В., Содин Л. Г. Радиотелескоп декаметрового діапазона волн УТР-2. *Антенны*. Москва: Связь, 1978. Вып. 26. С. 3–14.
2. *Академик С. Я. Брауде в воспоминаниях современников*. Под ред. А. А. Костенко. Харьков: РИ НАН Украины, 2005. 328 с.
3. Базелян Л. Л., Брук Ю. М., Жук И. Н., Мень А. В., Шарыкин Н. К. Широкополосная высоконаправленная антенна декаметровых волн. *Электросвязь*. 1964. № 5. С. 14–21.
4. Базелян Л. Л., Брук Ю. М., Жук И. Н., Мень А. В., Содин Л. Г., Шарыкин Н. К. Широкополосный радиointерферометр с электрическим управлением диаграммой направленности. *Известия вузов. Радиофизика*. 1964. Т. 7, № 2. С. 215–224.
5. Брук Ю. М., Гончаров Н. Ю., Жук И. Н., Инютин Г. А., Мень А. В., Содин Л. Г., Шарыкин Н. К. Экспериментальные исследования многоэлементных антенн – решеток радиотелескопа УТР-1. *Известия вузов. Радиофизика*. 1968. Т. 11, № 1. С. 28–43.
6. Braude S. Ya., Lebedeva O. M., Megn A. V., Ryabov B. P., and Zhouck I. N. The Spectra of Discrete Radio Sources at Decametric Wavelengths – I. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 1969. Vol. 143, Is. 3. P. 289–300. DOI: 10.1093/mnras/143.3.289
7. Крымкин В. В. Спектр низкочастотного радиоизлучения фона. *Известия вузов. Радиофизика*. 1971. Т. 14, № 2. С. 199–203.
8. Krymkin V. V. Observations of the Rosette nebula NGC 2237 at decametric wavelengths. *Astrophys. Space Sci.* 1978. Vol. 54. P. 187–197. DOI: 10.1007/BF00637907
9. Абранин Э. П., Базелян Л. Л., Гончаров Н. Ю., Зайцев В. В., Зиничев В. А., Рапопорт В. О., Цыбко Я. Г. Об угловых размерах источников солнечных радиовсплесков в декаметровом диапазоне. *Астрономический журнал*. 1975. Т. 52, № 5. С. 993–998.
10. Bruck Yu. M. and Ustimenko B. Yu. Decametric Pulse Radioemission from PSR 0809, PSR 1133, and PSR 1919. *Nature Phys. Sci.* 1973. Vol. 242. P. 58–59. DOI: 10.1038/physci242058a0
11. Брук Ю. М., Содин Л. Г. Расчет основных параметров фазированной антенны-решетки при дискретно-этажном несинхронном управлении положением луча. *Радиотехника*. 1966. Т. 21, № 7. С. 16–25.
12. Брук Ю. М. О структуре и свойствах фазированной решетки с минимальным числом переключающих элементов. *Радиотехника*. 1973. Т. 28, № 3. С. 46–50.
13. Содин Л. Г. К теории оптимальных антенн. *Радиотехника и электроника*. 1967. Т. 12, № 12. С. 2108–2117.
14. Литвиненко Л. Н., Ваврив Д. М., Коноваленко А. А., Костенко А. А., Мельник В. Н., Минаков А. А., Просвирнин С. Л., Фалькович И. С., Чурилов В. П., Шарапов Л. И., Шульга В. М., Ямпольский Ю. М. *Радиоастрономический институт НАН Украины 25 лет*. Под ред. Л. Н. Литвиненко. Харьков: ИПП “Контраст”, 2010. 304 с.
15. Мень А. В., Содин Л. Г., Шарыкин Н. К., Брук Ю. М., Мельяновский П. А., Инютин Г. А., Гончаров Н. Ю. Принципы построения и характеристики антенн радиотелескопа УТР-2. *Антенны*. Москва: Связь, 1978. Вып. 26. С. 15–57.
16. Braude S. Ya., Megn A. V., Ryabov B. P., Sharykin N. K., and Zhouck I. N. Decametric survey of discrete sources in the Northern sky. I. The UTR-2 radio telescope. Experimental techniques and data processing. *Astrophys. Space Sci.* 1978. Vol. 54. P. 3–36. DOI: 10.1007/BF00637902
17. Konovalenko A., Sodin L., Zakharenko V., Zarka P., Ulyanov O., Sidorchuk M., Stepkin S., Tokarsky P., Melnik V., Kalinichenko N., Stanislavsky A., Koliadin V., Shepelev V., Dorovskyy V., Ryabov V., Koval A., Bubnov I., Yerin S., Gridin A., Kulishenko V., Reznichenko A., Bortsov V., Lisachenko V., Reznik A., Kvasov G., Mukha D., Litvinenko G., Khristenko A., Shevchenko V. V., Shevchenko V. A., Belov A., Rudavin E., Vasylieva I., Miroshnichenko A., Vasilenko N., Olyak M., Mylostna K., Skoryk A., Shevtsova A., Plakhov M., Kravtsov I., Volvach Y., Lytvinenko O., Shevchuk N., Zhouk I., Bovkun V., Antonov A., Vavriv D., Vinogradov V., Kozhin R., Kravtsov A., Bulakh E., Kuzin A., Vasilyev A., Brazhenko A., Vashchishin R., Pylaev O., Koshovyy V., Lozinsky A., Ivantyshin O., Rucker H. O., Panchenko M., Fischer G., Lecacheux A., Denis L., Coffre A., Griefmeier J.-M., Tagger M., Girard J., Charrier D., Briand C., and Mann G. The modern radio astronomy network in Ukraine: UTR-2, URAN and GURT. *Exp. Astron.* 2016. Vol. 42, Is. 1. P. 11–48. DOI: 10.1007/s10686-016-9498-x
18. Мень А. В., Бовкун В. П. Помехоустойчивые широкополосные антенные усилители. *Антенны*. Москва: Связь, 1978. Вып. 26. С. 75–91.
19. Abranin E. P., Bruck Yu. M., and Konovalenko A. A. Highly linear broadband amplifiers with lossless feedback. Part 2: Experience of development. *Int. J. Electron.* 1990. Vol. 69, Is. 3. P. 345–357. DOI: 10.1080/00207219008920320
20. Абранин Е. П., Брук Ю. М., Захаренко В. В., Коноваленко А. А. Структура и параметры новой системы антенного усиления радиотелескопа УТР-2. *Радиофізика і радіоастрономія*. 1997. Т. 2, № 1. С. 95–102.
21. Abranin E. P., Bruck Yu. M., Zakharenko V. V., and Konovalenko A. A. The New Preamplification System for the UTR-2 Radio Telescope. *Exp. Astron.* 2001. Vol. 11, Is. 2. P. 85–112. DOI: 10.1023/A:1011109128284
22. Bruck Yu. M. and Zakharenko V. V. Novel matched amplifiers with low noise positive feedback. Part II: Resistive-capacitive feedback. *Int. J. Electron.* 2010. Vol. 97, Is. 2. P. 217–240. DOI: 10.1080/00207210903168819
23. Zakharenko V. V., Sharykin N. K., and Rudavin E. R. Modernization of Commutation Devices and an Improvement of Main Parameters of the UTR-2 Radio Telescope. *Kinemat. Phys. Celest. Bodies*. 2005. Vol. 21, No. 5 Suppl. P. 90–92.

24. Мень А. В., Брауде С. Я., Рашковский С. Л., Шарыкин Н. К., Шепелев В. А., Инютин Г. А., Христенко А. Д., Булацен В. Г., Браженко А. И., Кошевой В. В., Романчев Ю. В., Цесевич В. П., Галанин В. В. Система декаметровых радиointерферометров УРАН (ч. 1). Основные принципы. Обзор. *Радиофізика і радіоастрономія*. 1997. Т. 2, № 4. С. 385–401.
25. Konovalenko A. A., Falkovich I. S., Kalinichenko N. N., Gridin A. A., Bubnov I. N., Lecacheux A., Rosolen C., and Rucker H. O. Thirty-Element Active Antenna Array as a Prototype of a Huge Low-Frequency Radio Telescope. *Exp. Astron.* 2003. Vol. 16, Is. 3. P. 149–164. DOI: 10.1007/s10686-003-0030-8
26. Falkovich I. S., Konovalenko A. A., Gridin A. A., Sodin L. G., Bubnov I. N., Kalinichenko N. N., Rashkovskii S. L., Mukha D. V., and Tokarsky P. L. Wide-band high linearity active dipole for low frequency radio astronomy. *Exp. Astron.* 2011. Vol. 32, Is. 2. P. 127–145. DOI: 10.1007/s10686-011-9256-z
27. Tokarsky P. L., Konovalenko A. A., and Yerin S. N. Sensitivity of an Active Antenna Array Element for the Low-Frequency Radio Telescope GURT. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2017. Vol. 65, Is. 9. P. 4636–4644. DOI: 10.1109/TAP.2017.2730238
28. Tokarsky P. L., Konovalenko A. A., Yerin S. N., and Bubnov I. N. An Active Antenna Subarray for the Low-Frequency Radio Telescope GURT – Part I: Design and Theoretical Model. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2019. Vol. 67, Is. 12. P. 7304–7311. DOI: 10.1109/TAP.2019.2927841
Tokarsky P. L., Konovalenko A. A., Yerin S. N., and Bubnov I. N. An Active Antenna Subarray for the Low-Frequency Radio Telescope GURT – Part II: Numerical Analysis and Experiment. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2019. Vol. 67, Is. 12. P. 7312–7319. DOI: 10.1109/TAP.2019.2929322
29. Коноваленко А. А. Радиоспектрометр для поиска слабых спектральных линий. *Приборы и техника эксперимента*. 1981. № 6. С. 123–126.
30. Konovalenko A. A. and Sodin L. G. The 26.13 MHz absorption line in the direction of Cassiopeia A. *Nature*. 1981. Vol. 294, No. 5837. P. 135–136. DOI: 10.1038/294135a0
31. 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. 235–300. DOI: 10.1023/A:1015534108849
32. Коноваленко О. О., Захаренко В. В., Калініченко М. М., Мельник В. М., Сидорчук М. А., Станіславський О. О., Степкін С. В., Ульянов О. М. Радіовипромінювання Всесвіту на декаметрових хвилях. *Радиофізика і радіоастрономія*. 2019. Т. 24, № 1. С. 3–43. DOI: 10.15407/grg24.01.003
33. Гольинкин А. А., Коноваленко А. А. Рекомбинационные линии высоковозбужденного углерода вблизи туманностей DR-21 и S140. *Письма в Астрономический журнал*. 1991. Т. 17, № 1, С. 16–22.
34. Степкин С. В. Цифровой знаковый коррелометр для радиоастрономической спектроскопии. *Радиофізика і радіоастрономія*. 1996. Т. 1, № 2. С. 255–258.
35. Konovalenko A. A. and Stepkin S. V. Radio Recombination Lines. In: L. I. Gurvits, S. Frey, and S. Rawlings, eds., *Radio Astronomy from Karl Jansky to Microjansky*. Budapest, Hungary: EAS Publ., 2005. Vol. 15, P. 271–295. DOI: 10.1051/eas:2005158
36. Коноваленко А. А., Соколов К. П., Степкин С. В. Определение оптимальных частот наблюдений на радиотелескопе УТР-2 в режиме радиообзора небесной сферы. *Радиофізика і радіоастрономія*. 1997. Т. 2, № 2, С. 188–198.
37. Stepkin S. V., Konovalenko A. A., Kantharia N. G., and Udaya Shankar N. Radio recombination lines from the largest bound atoms in space. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2007. Vol. 374, Is. 3. P. 852–856. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2006.11190.x
38. Mel'nik V. N., Konovalenko A. A., Rucker H. O., Stanislavsky A. A., Abranin E. P., Lecacheux A., Mann G., Warmuth A., Zaitsev V. V., Boudjada M. Y., Dorovskii V. V., Zaharenko V. V., Lisachenko V. N., and Rosolen C. Observations of Solar Type II bursts at frequencies 10–30 MHz. *Sol. Phys.* 2004. Vol. 222, Is. 1. P. 151–166. DOI: 10.1023/B:SOLA.0000036854.66380.a4
39. Vasilenko N. M. and Sidorchuk M. A. Separation of galactic and extragalactic radio emission at decameter wavelengths. *Astrophys. Space Sci.* 2017. Vol. 362, Is. 12. id. 221. DOI: 10.1007/s10509-017-3202-0
40. Фалькович И. С., Гридин А. А., Калиниченко Н. Н., Бубнов И. Н. Шестнадцатиполосный корреляционный радиометр для наблюдения межпланетных мерцаний. *Радиофізика і радіоастрономія*. 2005. Т. 10, № 4. С. 392–397.
41. Kalinichenko N. N. A search for compact decametric radio sources in supernova remnants using the interplanetary scintillation technique. *Astrophys. Space Sci.* 2009. Vol. 319, Is. 2. P. 131–138. DOI: 10.1007/s10509-008-9960-y
42. Konovalenko A. A., Kalinichenko N. N., Rucker H. O., Lecacheux A., Fischer G., Zarka P., Zakharenko V. V., Mylostna K. Y., Griesmeier J.-M., Abranin E. P., Falkovich I. S., Sidorchuk K. M., Kurth W. S., Kaiser M. L., and Gurnett D. A. Earliest recorded ground-based decameter wavelength observations of Saturn's lightning during the giant E-storm detected by Cassini spacecraft in early 2006. *Icarus*. 2013. Vol. 224, Is. 1. P. 14–23. DOI: 10.1016/j.icarus.2012.07.024
43. Захаренко В. В., Николаенко В. С., Ульянов О. М., Мотиенко Р. А. Приемник с высоким временным разрешением для исследования радиоизлучения. *Радиофізика і радіоастрономія*. 2007. Т. 12, № 3. С. 233–241.
44. Станіславський А. А., Абранін Е. П., Коноваленко А. А., Коваль А. А. Гелиограф радиотелескопа УТР-2. I. Общая схема. *Радиофізика і радіоастрономія*. 2011. Т. 16, № 1. С. 5–14.
45. Koval A., Stanislavsky A., Chen Y., Feng S., Konovalenko A., and Volvach Ya. A Decameter Stationary Type IV Burst in Imaging Observations on 2014 September 6. *Astrophys. J.* 2016. Vol. 826, Is. 2. id. A125. DOI: 10.3847/0004-637X/826/2/125
46. Рашковский С. Л., Белов А. С., Иванов А. С., Лозинский А. Б., Шепелев В. А. Новый аппаратно-программный комплекс УРАН. *Радиофізика і радіоастрономія*. 2012. Т. 17, № 3. С. 207–217.

47. Шепелев В. А. Определение угловых параметров источников радиоизлучения Солнца на декаметровых волнах. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2015. Т. 20, № 1. С. 20–29. DOI: 10.15407/rpra20.01.020
48. Содин Л. Г., Фалькович И. С., Калининченко Н. Н. Использование поверхностной и пространственной волн для измерения диэлектрической проницаемости почвы и уточнения характеристик наземных антенн. *Радиотехника и электроника*. 1996. Т. 41, № 10. С. 1191–1196.
49. Lecacheux A., Konovalenko A. A., and Rucker H. O. Using large radio telescopes at decametre wavelengths. *Planet. Space Sci.* 2004. Vol. 52, Is. 15. P. 1357–1374. DOI: 10.1016/j.pss.2004.09.006
50. 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., Vasylykivskiy Y., Vavriv D., Vinogradov V., Kozhin R., Kravtsov A., Bulakh E., Kuzin A., Vasilyev A., Ryabov V., Reznichenko A., Bortsov V., Lisachenko V., Kvasov G., Mukha D., Litvinenko G., Brazhenko A., Vashchishin R., Pylaev O., Koshovyy V., Lozinsky A., Ivantyshyn O., Rucker H. O., Panchenko M., Fischer G., Lecacheux A., Denis L., Coffre A., and 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
51. Шепелев В. А., Коноваленко А. А., Литвиненко О. А., Исаева Е. А., Ващишин Р. В. Использование широкополосных цифровых приемников в интерферометрических наблюдениях сети УРАН. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2017. Т. 22, № 4. С. 247–255. DOI: 10.15407/rpra22.04.247
52. Колядин В. Л. Использование фазовых динамических кросс-спектров для широкополосных радиоастрономических наблюдений: опыт применения на радиотелескопе УТР-2. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2011. Т. 16, № 4. С. 341–354.
53. Shevchuk N. V., Melnik V. N., Poedts S., Dorovskyy V. V., Magdalenic J., Konovalenko A. A., Brazhenko A. I., Briand C., Frantsuzenko A. V., Rucker H. O., and Zarka P. The Storm of Decameter Spikes During the Event of 14 June 2012. *Sol. Phys.* 2016. Vol. 291, Is 1. P. 211–228. DOI: 10.1007/s11207-015-0799-4
54. Ryabov V. B., Zarka P., Hess S., Konovalenko A., Litvinenko G., Zakharenko V., Shevchenko V. A., and Cecconi B. Fast and slow frequency-drifting millisecond bursts in Jovian decametric radio emissions. *Astron. Astrophys.* 2014. Vol. 568. id. A53. DOI: 10.1051/0004-6361/201423927
55. Panchenko M., Rošker S., Rucker H. O., Brazhenko A., Zarka P., Litvinenko G., Shaposhnikov V. E., Konovalenko A. A., Melnik V., Franzuzenko A. V., and Schiemel J. Zebra pattern in decametric radio emission of Jupiter. *Astron. Astrophys.* 2018. Vol. 610. id. A69. DOI: 10.1051/0004-6361/201731369
56. Zakharenko V. V., Vasylieva I. Y., Konovalenko A. A., Ulyanov O. M., Serylak M., Zarka P., Griebmeier J.-M., Cognard I., and Nikolaenko V. S. Detection of decametre-wavelength pulsed radio emission of 40 known pulsars. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2013. Vol. 431, Is. 4. P. 3624–3641. DOI: 10.1093/mnras/stt470
57. Ulyanov O. M., Skoryk A. O., Shevtsova A. I., Plakhov M. S., and Ulyanova O. O. Detection of the Fine Structure of the Pulsar J0953+0755 Radio Emission in the Decametre Wave Range. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2016. Vol. 455, Is. 1. P. 150–157. DOI: 10.1093/mnras/stv2172
58. Коноваленко А. А. Исследования Вселенной методами низкочастотной радиоастрономии в Украине. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2018. Т. 23, № 1. С. 3–23. DOI: 10.15407/rpra23.01.003
59. Imai M., Lecacheux A., Clarke T. E., Higgins C. A., Panchenko M., Dowell J., Imai K., Brazhenko A. I., Frantsuzenko A. V., and Konovalenko A. A. The beaming structures of Jupiter's decametric common S-bursts observed from the LWA1, NDA, and URAN2 radio telescopes. *Astrophys. J.* 2016. Vol. 826, No. 2. id. 176. DOI: 10.3847/0004-637x/826/2/176
60. Коноваленко А. А. И. С. Шкловский и низкочастотная радиоастрономия. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2017. Т. 22, № 1. С. 7–30. DOI: 10.15407/rpra22.01.007
61. Zakharenko V., Mylostna C., Konovalenko A., Zarka P., Fischer G., Griebmeier J.-M., Litvinenko G., Rucker H., Sidorchuk M., Ryabov B., Vavriv D., Ryabov V., Cecconi B., Coffre A., Denis L., Fabrice C., Pallier L., Schneider J., Kozhyn R., Vinogradov V., Mukha D., Weber R., Shevchenko V., and Nikolaenko V. Ground-based and spacecraft observations of lightning activity on Saturn. *Planet. Space Sci.* 2012. Vol. 61, Is. 1. P. 53–59. DOI: 10.1016/j.pss.2011.07.021
62. Zarka P., Farrel W., Fischer G., and Konovalenko A. Ground-Based and Space-Based Radio Observations of Planetary Lightning. *Space Sci. Rev.* 2008. Vol. 137, Is. 1-4. P. 257–269. DOI: 10.1007/s11214-008-9366-8
63. Konovalenko A. A., Stanislavsky A. A., Rucker H. O., Lecacheux A., Mann G., Bougeret J.-L., Kaiser M. L., Briand C., Zarka P., Abranin E. P., Dorovskyy V. V., Koval A. A., Mel'nik V. N., Mukha D. V., and Panchenko M. Synchronized observations by using the STEREO and the largest ground-based decametre radio telescope. *Exp. Astron.* 2013. Vol. 36, Is. 1-2. P. 137–154. DOI: 10.1007/s10686-012-9326-x
64. Zarka P., Bougeret J.-L., Briand C., Cecconi B., Falcke H., Girard J., Griebmeier J.-M., Hess S., Klein-Wolt M., Konovalenko A., Lamy L., Mimoun D., and Aminaei A. Planetary and exoplanetary low frequency radio observations from the Moon. *Planet. Space Sci.* 2012. Vol. 74, Is. 1. P. 156–166. DOI: 10.1016/j.pss.2012.08.004
65. Shkuratov Y. G., Konovalenko A. A., Zakharenko V. V., Stanislavsky A. A., Bannikova E. Y., Kaydash V. G., Stankevich D. G., Korokhin V. V., Vavriv D. M., Galushko V. G., Yerin S. N., Bubnov I. N., Tokarsky P. L., Ulyanov O. M., Stepkin S. V., Lytvynenko L. N., Yatskiv Y. S., Videen G., Zarka P., and Rucker H. O. A twofold mission to the moon: Objectives and payload. *Acta Astronaut.* 2019. Vol. 154. P. 214–226. DOI: 10.1016/j.actaastro.2018.03.038
66. 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., Калининченко Н. Н., Литвиненко Г. В., Зарка Ф., Дени Л., Жирар Ж., Рукер 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. *Радиофизика і радіоастрономія*. 2016. Т. 21, № 2. С. 83–131. DOI: 10.15407/rpra21.02.083
67. Vavilova I. B., Konovalenko A. A., and Megn A. V. The beginning of decameter radio astronomy: pioneering works of Semen Ya. Braude and his followers in Ukraine. *Astron. Nachr.* 2007. Vol. 328, Is. 5. P. 420–425. DOI: 10.1002/asna.200710762
- ## REFERENCES
- BRAUDE, S. YA., MEGN, A. V. and SODIN, L. G., 1978. Decameter wavelength radio telescope UTR-2. *Antennas*. Moscow, Russia: Svyaz' Publ., no. 26, pp. 3–14. (in Russian).
 - KOSTENKO, A. A., ed., 2005. *Academician S. Ya. Braude in the memoirs of his contemporaries*. Kharkiv, Ukraine: RI NANU Publ. (in Russian).
 - BAZELYAN, L. L., BRUCK, YU. M., ZHOUCK, I. N., MEGN, A. V. and SHARYKIN, N. K., 1964. Broadband highly directional decameter wave antenna. *Electrosvyaz'*. no. 5, pp. 14–21. (in Russian).
 - BAZELYAN, L. L., BRUCK, YU. M., ZHOUCK, I. N., MEGN, A. V., SODIN, L. G. and SHARYKIN, N. K., 1964. Electrically controlled broadband radio interferometer. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Radiofiz.* vol. 7, no. 2, pp. 215–224. (in Russian).
 - BRUCK, YU. M., GONCHAROV, N. Yu., ZHOUCK, I. N., INYUTIN, G. A., MEGN, A. V., SODIN, L. G. and SHARYKIN, N. K., 1968. Experimental studies of multielement antenna arrays of the UTR-1 radio telescope. *Radiophys. Quantum Electron.* vol. 11, is. 1, pp. 14–24. DOI: 10.1007/BF01033535
 - BRAUDE, S. YA., LEBEDEVA, O. M., MEGN, A. V., RYABOV, B. P. and ZHOUCK, I. N., 1969. The Spectra of Discrete Radio Sources at Decametric Wavelengths – I. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* vol. 143, is. 3, pp. 289–300. DOI: 10.1093/mnras/143.3.289
 - KRYMKIN, V. V., 1971. The spectrum of background low-frequency radio emission. *Radiophys. Quantum Electron.* vol. 14, is. 2, pp. 161–164. DOI: 10.1007/BF01031395
 - KRYMKIN, V. V., 1978. Observations of the Rosette nebula NGC 2237 at decametric wavelengths. *Astrophys. Space Sci.* vol. 54, pp. 187–197. DOI: 10.1007/BF00637907
 - ABRANIN, E. P., BAZELYAN, L. L., GONCHAROV, N. YU., ZAITSEV, V. V., ZINICHEV, V. A., RAPOPORT, V. A. and TSYBKO, YA. G., 1976. Angular sizes of sources of solar radio burst in the decameter range. *Sov. Astron.* vol. 19, no. 5, pp. 602–605.
 - BRUCK, YU. M. and USTIMENKO, B. YU., 1973. Decametric Pulse Radioemission from PSR 0809, PSR 1133, and PSR 1919. *Nature Phys. Sci.* vol. 242, pp. 58–59. DOI: 10.1038/physci242058a0.
 - BRUCK, YU. M. and SODIN, L. G., 1966. Calculation of the main parameters of a phased array antenna with discrete-storey asynchronous control of the beam position. *Radiotekhnika*. vol. 21, no. 7, pp. 16–25. (in Russian).
 - BRUCK, YU. M., 1973. On the structure and properties of a phased array with a minimum number of switching elements. *Radiotekhnika*. vol. 28, no. 3, pp. 46–50. (in Russian).
 - SODIN, L. G., 1967. On the theory of optimal antennas. *Radiotekhnika i elektronika*. vol. 12, no. 12, pp. 2108–2117. (in Russian).
 - LYTVYNENKO, L. N. (ed.), VAVRIV, D. M., KONOVALENKO, A. A., KOSTENKO, A. A., MELNIK, V. N., MINAKOV, A. A., PROSVIRNIN, S. L., FALKOVICH, I. S., CHURILOV, V. P., SHARAPOV, L. I., SHULGA, V. N. and YAMPOLSKY, Yu. M., 2010. *Institute of Radio Astronomy of NAS of Ukraine. 25 years*. Kharkiv, Ukraine: IPP “Kontrast” Publ. (in Russian).
 - MEGN, A. V., SODIN, L. G., SHARYKIN, N. K., BRUCK, YU. M., MEL'YANOVSKY, P. A., INYUTIN, G. A. and GONCHAROV, N. Yu., 1978. Principles of construction and characteristics of antennas of the UTR-2 radio telescope. *Antennas*. Moscow, Russia: Svyaz' Publ., no. 26. pp. 15–57. (in Russian).
 - BRAUDE, S. YA., MEGN, A. V., RYABOV, B. P., SHARYKIN, N. K. and ZHOUCK, I. N., 1978. Decametric survey of discrete sources in the Northern sky. I. The UTR-2 radio telescope. Experimental techniques and data processing. *Astrophys. Space Sci.* vol. 54, pp. 3–36. DOI: 10.1007/BF00637902
 - KONOVALENKO, A., SODIN, L., ZAKHARENKO, V., ZARKA, P., ULYANOV, O., SIDORCHUK, M., STEP-KIN, S., TOKARSKY, P., MELNIK, V., KALINICHENKO, N., STANISLAVSKY, A., KOLIADIN, V., SHEPELEV, V., DOROVSKYY, V., RYABOV, V., KOVAL, A., BUBNOV, I., YERIN, S., GRIDIN, A., KULISHENKO, V., REZNICHENKO, A., BORTSOV, V., LISACHENKO, V., REZNIK, A., KVASOV, G., MUKHA, D., LITVINENKO, G., KRISTENKO, A., SHEVCHENKO, V. V., SHEVCHENKO, V. A., BELOV, A., RUDAVIN, E., VASYLIEVA, I., MIROSHNICHENKO, A., VASILENKO, N., OLYAK, M., MYLOSTNA, K., SKORYK, A., SHEVTSOVA, A., PLAKHOV, M., KRAVTSOV, I., VOLVACH, Y., LYTVINENKO, O., SHEVCHUK, N., ZHOUC, I., BOVKUN, V., ANTONOV, A., VAVRIV, D., VINOGRADOV, V., KOZHIN, R., KRAVTSOV, A., BULAKH, E., KUZIN, A., VASILYEV, A., BRAZHENKO, A., VASHCHISHIN, R., PYLAEV, O., KOSHOVYY, V., LOZINSKY, A., IVANTYSHIN, O., RUCKER, H. O., PANCHENKO, M., FISCHER, G., LECACHEUX, A., DENIS, L., COFFRE, A., GRIEBMEIER, J.-M., TAGGER, M., GIRARD, J., CHARRIER, D., BRIAND, C. and MANN, G., 2016. The modern radio astronomy network in Ukraine: UTR-2, URAN and GURT. *Exp. Astron.* vol. 42, is. 1, pp. 11–48. DOI: 10.1007/s10686-016-9498-x
 - MEGN, A. V. and BOVKUN, V. P., 1978. Noise-immune wideband antenna amplifiers. *Antennas*. Moscow, Russia: Svyaz' Publ., no. 26. pp. 75–91. (in Russian).
 - ABRANIN, E. P., BRUCK, YU. M. and KONOVALENKO, A. A., 1990. Highly linear broadband amplifiers with lossless feedback. Part 2: Experience of develop-

- ment. *Int. J. Electron.* vol. 69, is. 3, pp. 345–357. DOI: 10.1080/00207219008920320
20. ABRANIN, E. P., BRUCK, YU. M., ZAKHARENKO, V. V. and KONOVALENKO, A. A., 1997. Structure and parameters of new system of antenna amplification of radio telescope UTR-2. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 2, no. 1, pp. 95–102. (in Russian).
 21. ABRANIN, E. P., BRUCK, YU. M., ZAKHARENKO, V. V. and KONOVALENKO, A. A., 2001. The New Pre-amplification System for the UTR-2 Radio Telescope. *Exp. Astron.* vol. 11, is. 2, pp. 85–112. DOI: 10.1023/A:1011109128284
 22. BRUCK, YU. M. and ZAKHARENKO, V. V., 2010. Novel matched amplifiers with low noise positive feedback. Part II: Resistive-capacitive feedback. *Int. J. Electron.* vol. 97, is. 2, pp. 217–240. DOI: 10.1080/00207210903168819
 23. ZAKHARENKO, V. V., SHARYKIN, N. K. and RUDAVIN, E. R., 2005. Modernization of Commutation Devices and an Improvement of Main Parameters of the UTR-2 Radio Telescope. *Kinemat. Phys. Celest. Bodies.* vol. 21, no. 5 Suppl., pp. 90–92.
 24. MEGN, A. V., BRAUDE, S. YA., RASHKOVSKIY, S. L., SHARYKIN, N. K., SHEPELEV, V. A., INYUTIN, G. A., KRISTENKO, A. D., BULATSEN, V. G., BRAZHENKO, A. I., KOSHOV, V. V., ROMANCHEV, YU. V., THESEVICH, V. P. and GALANIN, V. V., 1997. URAN System of Decametric Interferometers (I). *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 2, no. 4, pp. 385–401. (in Russian).
 25. KONOVALENKO, A. A., FALKOVICH, I. S., KALINICHENKO, N. N., GRIDIN, A. A., BUBNOV I. N., LECACHEUX, A., ROSOLEN, C. and RUCKER, H. O., 2003. Thirty-Element Active Antenna Array as a Prototype of a Huge Low-Frequency Radio Telescope. *Exp. Astron.* vol. 16, is. 3, pp. 149–164. DOI: 10.1007/s10686-003-0030-8
 26. FALKOVICH, I. S., KONOVALENKO, A. A., GRIDIN, A. A., SODIN, L. G., BUBNOV, I. N., KALINICHENKO, N. N., RASHKOVSKII, S. L., MUKHA, D. V. and TOKARSKY, P. L., 2011. Wide-band high linearity active dipole for low frequency radio astronomy. *Exp. Astron.* vol. 32, pp. 127–145. DOI: 10.1007/s10686-011-9256-z
 27. TOKARSKY, P. L., KONOVALENKO, A. A. and YERIN S. N., 2017. Sensitivity of an Active Antenna Array Element for the Low-Frequency Radio Telescope GURT. *IEEE Trans. Antennas Propag.* vol. 65, is. 9, pp. 4636–4644. DOI: 10.1109/TAP.2017.2730238
 28. TOKARSKY, P. L., KONOVALENKO, A. A., YERIN, S. N. and BUBNOV, I. N., 2019. An Active Antenna Subarray for the Low-Frequency Radio Telescope GURT – Part I: Design and Theoretical Model. *IEEE Trans. Antennas Propag.* vol. 67, is. 12, pp. 7304–7311. DOI: 10.1109/TAP.2019.2927841
 - TOKARSKY, P. L., KONOVALENKO, A. A., YERIN, S. N. and BUBNOV, I. N., 2019. An Active Antenna Subarray for the Low-Frequency Radio Telescope GURT – Part II: Numerical Analysis and Experiment. *IEEE Trans. Antennas Propag.* vol. 67, is. 12, pp. 7312–7319. DOI: 10.1109/TAP.2019.2929322
 29. KONOVALENKO, A. A., 1981. Radio spectrometer for searching for weak spectral lines. *Pribory i tekhnika experimenta.* no. 6, pp. 123–126. (in Russian).
 30. KONOVALENKO, A. A. and SODIN, L. G., 1981. The 26.13 MHz absorption line in the direction of Cassiopeia A. *Nature.* vol. 294, no. 5837, pp. 135–136. DOI: 10.1038/294135a0
 31. BRAUDE, S. YA., RASHKOVSKIY, 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. 235–300. DOI: 10.1023/A:1015534108849
 32. KONOVALENKO, O. O., ZAKHARENKO, V. V., KALINICHENKO, M. M., MELNIK V. M., SIDORCHUK, M. A., STANISLAVSKIY, A. A., STEPKIN, S. V. and ULYANOV, O. M., 2019. The Universe Radio Emission at Decameter Wavelengths. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 24, no. 1, pp. 3–43. (in Ukrainian). DOI: 10.15407/rpra24.01.003
 33. GOLYNKIN, A. A. and KONOVALENKO, A. A., 1991. Recombination lines of highly excited carbon near the nebulosities DR-21 and S140. *Sov. Astron. Lett.* vol. 17, is. 1, pp. 16–22. (in Russian).
 34. STEPKIN, S. V., 1996. Digital Sign Correlometer for Radio Astronomical Spectroscopy. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 1, no. 2, pp. 255–258. (in Russian).
 35. KONOVALENKO, A. A. and STEPKIN, S. V., 2005. Radio recombination lines. In: L. I. GURVITS, S. FREY, and S. RAWLINGS, eds., *Radio Astronomy from Karl Jansky to Microjanski.* Budapest, Hungary: EAS Publ. vol. 15, pp. 271–295. DOI: 10.1051/eas:2005158
 36. KONOVALENKO, A. A., SOKOLOV, K. P. and STEPKIN, S. V., 1997. Determination of Optimum Operating Frequencies for Observations with UTR-2 Radio Telescope in the Sky Surveying Mode. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 2, no. 2, pp. 188–198. (in Russian).
 37. STEPKIN, S. V., KONOVALENKO, A. A., KANTHARIA, N. G. and UDAYA SHANKAR, N., 2007. Radio recombination lines from the largest bound atoms in space. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* vol. 374, is. 3, pp. 852–856. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2006.11190.x
 38. MEL'NIK, V. N., KONOVALENKO, A. A., RUCKER, H. O., STANISLAVSKIY, A. A., ABRANIN, E. P., LECACHEUX, A., MANN, G., WARMUTH, A., ZAITSEV, V. V., BOUDJADA, M. Y., DOROVSKII, V. V., ZAHARENKO, V. V., LISACHENKO, V. N. and ROSOLEN, C., 2004. Observations of Solar Type II bursts at frequencies 10–30 MHz. *Sol. Phys.* vol. 222, is. 1, pp. 151–166. DOI: 10.1023/B:SOLA.0000036854.66380.a4
 39. VASILENKO, N. M. and SIDORCHUK, M. A., 2017. Separation of galactic and extragalactic radio emission at decameter wavelengths. *Astrophys. Space Sci.* vol. 362, is. 12, id. 221. DOI: 10.1007/s10509-017-3202-0
 40. FALKOVICH, I. S., GRIDIN, A. A., KALINICHENKO, N. N. and BUBNOV, I. N., 2005. Sixteen-Band Correlation Radiometer for IPS Observations. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 10, no. 4, pp. 392–397. (in Russian).
 41. KALINICHENKO, N. N., 2009. A search for compact decametric radio sources in supernova remnants using the interplanetary scintillation technique. *Astrophys. Space Sci.* vol. 319, is. 2, pp. 131–138. DOI: 10.1007/s10509-008-9960-y

42. KONOVALENKO, A. A., KALINICHENKO, N. N., RUCKER, H. O., LECACHEUX, A., FISCHER, G., ZARKA, P., ZAKHARENKO, V. V., MYLOSTNA, K. Y., GRIEBMEIER, J.-M., ABRANIN, E. P., FALKOVICH, I. S., SIDORCHUK, K. M., KURTH, W. S., KAISER, M. L. and GURNETT, D. A., 2013. Earliest recorded ground-based decameter wavelength observations of Saturn's lightning during the giant E-storm detected by Cassini spacecraft in early 2006. *Icarus*. vol. 224, is. 1, pp. 14–23. DOI: 10.1016/j.icarus.2012.07.024
43. ZAKHARENKO, V. V., NIKOLAENKO V. S., ULYANOV, O. M. and MOTIYENKO, R. A., 2007. A High Time Resolution Receiver for Radio Emission Investigation. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 12, no. 3, pp. 233–241. (in Russian).
44. STANISLAVSKY, A. A., ABRANIN, E. P., KONOVALENKO, A. A. and KOVAL, A. A., 2011. Heliograph of the UTR-2 Radio Telescope. I. General Scheme. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 16, no. 1, pp. 5–14. (in Russian).
45. KOVAL, A., STANISLAVSKY, A., CHEN, Y., FENG, S., KONOVALENKO, A. and VOLVACH, YA., 2016. A Decameter Stationary Type IV Burst in Imaging Observations on 2014 September 6. *Astrophys. J.* vol. 826, is. 2, id. A125. DOI: 10.3847/0004-637X/826/2/125
46. RASHKOVSKIY, S. L., BELOV, A. S., IVANOV, A. S., LOZINSKIY, A. B. and SHEPELEV, V. A., 2012. The URAN's New Facilities and Software. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 17, no. 3, pp. 207–217. (in Russian).
47. SHEPELEV, V. A., 2015. Determination of Angular Parameters of the Sources of Solar Radio Emission at Decameter Wavelengths. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 20, no. 1, pp. 20–29. (in Russian). DOI: 10.15407/rpra20.01.020
48. SODIN, L. G., FALKOVICH, I. S. and KALINICHENKO, N. N., 1996. The use of surface and spatial waves for measuring the soil permittivity and the correction of the ground-based antenna characteristics. *Radiotekhnika i elektronika*. vol. 41, no. 10, pp. 1191–1196. (in Russian).
49. LECACHEUX, A., KONOVALENKO, A. A. and RUCKER, H. O., 2004. Using large radio telescopes at decametre wavelengths. *Planet. Space Sci.* vol. 52, is. 15, pp. 1357–1374. DOI: 10.1016/j.pss.2004.09.006
50. 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., VASYLKIVSKY, I. 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
51. SHEPELEV, V. A., KONOVALENKO, A. A., LITVINENKO, O. A., ISAEVA, E. A. and VASHCHISHIN, R. V., 2017. Using the Broadband Digital Receivers in Interferometer Observations with the URAN Network. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 22, no. 4, pp. 247–255. (in Russian). DOI: 10.15407/rpra22.04.247
52. KOLIADIN, V. L., 2011. Using Phase Dynamic Cross-Spectra for Wideband Radio Astronomy Observations: Experience from the UTR-2 Radio Telescope. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 16, no. 4, pp. 341–354. (in Russian).
53. SHEVCHUK, N. V., MELNIK, V. N., POEDTS, S., DOROVSKYY, V. V., MAGDALENIC, J., KONOVALENKO, A. A., BRAZHENKO, A. I., BRIAND, C., FRANTSUZENKO, A. V., RUCKER, H. O. and ZARKA, P., 2016. The Storm of Decameter Spikes During the Event of 14 June 2012. *Sol. Phys.* vol. 291, is. 1, pp. 211–228. DOI: 10.1007/s11207-015-0799-4
54. RYABOV, V. B., ZARKA, P., HESS, S., KONOVALENKO, A., LITVINENKO, G., ZAKHARENKO, V., SHEVCHENKO, V. A. and CECCONI, B., 2014. Fast and slow frequency-drifting millisecond bursts in Jovian decametric radio emissions. *Astron. Astrophys.* vol. 568, id. A53. DOI: 10.1051/0004-6361/201423927
55. PANCHENKO, M., ROŠKER, S., RUCKER, H. O., BRAZHENKO, A., ZARKA, P., LITVINENKO, G., SHAPOSHNIKOV, V. E., KONOVALENKO, A. A., MELNIK, V., FRANZUZENKO, A. V. and SCHIEMEL, J., 2018. Zebra pattern in decametric radio emission of Jupiter. *Astron. Astrophys.* vol. 610, id. A69. DOI: 10.1051/0004-6361/201731369
56. ZAKHARENKO, V. V., VASYLIEVA, I. Y., KONOVALENKO, A. A., ULYANOV, O. M., SERYLAK, M., ZARKA, P., GRIEBMEIER, J.-M., COGNARD, I. and NIKOLAENKO, V. S., 2013. Detection of decametre-wavelength pulsed radio emission of 40 known pulsars. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* vol. 431, is. 4, pp. 3624–3641. DOI: 10.1093/mnras/stt470
57. ULYANOV, O. M., SKORYK, A. O., SHEVTSOVA, A. I., PLAKHOV, M. S. and ULYANOVA, O. O., 2016. Detection of the Fine Structure of the Pulsar J0953+0755 Radio Emission in the Decametre Wave Range. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* vol. 455, is. 1, pp. 150–157. DOI: 10.1093/mnras/stv2172
58. KONOVALENKO, A. A., 2018. Investigation of the Universe by the Low-Frequency Radio Astronomy Methods in Ukraine. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 23, no. 1, pp. 3–23. (in Russian). DOI: 10.15407/rpra23.01.003
59. IMAI, M., LECACHEUX, A., CLARKE, T. E., HIGGINS, C. A., PANCHENKO, M., DOWELL, J., IMAI, K., BRAZHENKO, A. I., FRANTSUZENKO, A. V. and KONOVALENKO, A. A., 2016. The beaming structures of Jupiter's decametric common S-bursts observed from the LWA1, NDA, and URAN2 radio telescopes. *Astrophys. J.* vol. 826, no. 2, id. 176. DOI: 10.3847/0004-637x/826/2/176
60. KONOVALENKO, A. A., 2017. I. S. Shklovsky and Low-Frequency Radio Astronomy. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 22, no. 1, pp. 7–30. (in Russian). DOI: 10.15407/rpra22.01.007.
61. ZAKHARENKO, V., MYLOSTNA, C., KONOVALENKO, A., ZARKA, P., FISCHER, G., GRIEBMEIER, J.-M.,

- LITVINENKO, G., RUCKER, H., SIDORCHUK, M., RYABOV, B., VAVRIV, D., RYABOV, V., CECCONI, B., COFFRE, A., DENIS, L., FABRICE, C., PALLIER, L., SCHNEIDER, J., KOZHYN, R., VINOGRADOV, V., VASYLKIVSKY, D., WEBER, R., SHEVCHENKO, V. and NIKOLAENKO, V., 2012. Ground-based and spacecraft observations of lightning activity on Saturn. *Planet. Space Sci.* vol. 61, is. 1, pp. 53–59. DOI: 10.1016/j.pss.2011.07.021
62. ZARKA, P., FARREL, W., FISCHER, G. and KONOVALENKO, A., 2008. Ground-Based and Space-Based Radio Observations of Planetary Lightning. *Space Sci. Rev.* vol. 137, is. 1-4, pp. 257–269. DOI: 10.1007/s11214-008-9366-8
63. KONOVALENKO, A. A., STANISLAVSKY, A. A., RUCKER, H. O., LECACHEUX, A., MANN, G., BOUGERET, J.-L., KAISER, M. L., BRIAND, C., ZARKA, P., ABRANIN, E. P., DOROVSKY, V. V., KOVAL, A. A., MEL'NIK, V. N., MUKHA, D. V. and PANCHENKO, M., 2013. Synchronized observations by using the STEREO and the largest ground-based decametre radio telescope. *Exp. Astron.* vol. 36, is. 1-2, pp. 137–154. DOI: 10.1007/s10686-012-9326-x
64. ZARKA, P., BOUGERET, J.-L., BRIAND, C., CECCONI, B., FALCKE, H., GIRARD, J., GRIEBMEIER, J.-M., HESS, S., KLEIN-WOLT, M., KONOVALENKO, A., LAMY, L., MIMOUN, D. and AMINAEI, A., 2012. Planetary and exoplanetary low frequency radio observations from the Moon. *Planet. Space Sci.* vol. 74, is. 1, pp. 156–166. DOI: 10.1016/j.pss.2012.08.004
65. SHKURATOV, Y. G., KONOVALENKO, A. A., ZAKHARENKO, V. V., STANISLAVSKY, A. A., BANNIKOVA, E. Y., KAYDASH, V. G., STANKEVICH, D. G., KOROKHIN, V. V., VAVRIV, D. M., GALUSHKO, V. G., YERIN, S. N., BUBNOV, I. N., TOKARSKY, P. L., ULYANOV, O. M., STEPKIN, S. V., LYTVYENKO, L. N., YATSKIV, Y. S., VIDEEN, G., ZARKA, P. and RUCKER, H. O., 2019. A twofold mission to the moon: Objectives and payload. *Acta Astronaut.* vol. 154, pp. 214–226. DOI: 10.1016/j.actaastro.2018.03.038
66. 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., KOLIADIN, V. L., MELNIK, V. M., DOROVSKYY, V. V., KALINICHENKO, M. M., LITVINENKO, G. V., ZARKA, P., DENIS, L., GIRARD, J., RUCKER, 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 MYLOSTNA, 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
67. VAVILOVA, I. B., KONOVALENKO, A. A. and MEGN, A. V., 2007. The beginning of decameter radio astronomy: pioneering works of Semen Ya. Braude and his followers in Ukraine. *Astron. Nachr.* vol. 328, is. 5, pp. 420–425. DOI: 10.1002/asna.200710762
- O. O. Konovalenko¹, V. V. Zakharenko¹, L. M. Lytvynenko¹, O. M. Ulyanov¹, M. A. Sidorchuk¹, S. V. Stepkin¹, V. A. Shepelev¹, P. Zarka², H. O. Rucker³, A. Lecacheux², M. Panchenko³, Yu. M. Bruck¹, P. L. Tokarsky¹, I. M. Bubnov¹, S. M. Yerin¹, V. L. Koliadin¹, V. M. Melnik¹, M. M. Kalinichenko^{1,4}, O. O. Stanislavsky¹, V. V. Dorovskyy¹, O. D. Khristenko¹, V. V. Shevchenko¹, O. S. Belov¹, A. O. Gridin¹, O. V. Antonov¹, V. P. Bovkun¹, O. M. Reznichenko¹, V. M. Bortsov¹, G. V. Kvasov¹, L. M. Ostapchenko¹, M. V. Shevchuk¹, V. A. Shevchenko¹, Ya. S. Yatskiv⁵, I. B. Vavilova⁵, I. S. Braude¹, Y. G. Shkuratov^{8,1}, V. B. Ryabov¹, G. I. Pidgorny¹, A. G. Tymoshevsky¹, O. O. Lytvynenko¹, V. V. Galanin¹, M. I. Ryabov¹, A. I. Brazhenko⁶, R. V. Vashchishin⁶, A. V. Frantsuzenko⁶, V. V. Koshovyy⁷, O. L. Ivantyshyn⁷, A. B. Lozinsky⁷, B. S. Kharchenko⁷, I. Y. Vasylieva¹, I. P. Kravtsov¹, Y. V. Vasylykivsky¹, G. V. Litvinenko¹, D. V. Mukha¹, N. V. Vasylenko¹, A. I. Shevtsova¹, A. P. Miroshnichenko¹, N. V. Kuhai^{4,1}, Ya. M. Sobolev¹, and N. O. Tsvyk¹
- ¹ Institute of Radio Astronomy, National Academy of Sciences of Ukraine, 4, Mystetstv St., Kharkiv, 61002, Ukraine
- ² LESIA, Observatoire de Paris, CNRS, PSL/SU/UPMC/UPD/SPC, 5, Place Jules Janssen, Meudon, F-92195, France
- ³ Institut für Weltraumforschung, Österreichischen Akademie der Wissenschaften, 6, Schmiedlstrasse, Graz, 8042, Austria
- ⁴ Oleksandr Dovzhenko Hlukhiv National Pedagogical University, 24, Kyivo-Moskovska St., Hlukhiv, 41400, Ukraine
- ⁵ Main Astronomical Observatory, National Academy of Sciences of Ukraine, 27, Akademik Zabolotny St., Kyiv, 03143, Ukraine
- ⁶ Poltava Gravimetric Observatory, S. Subbotin Institute of Geophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, 27/29, Miasoiedov St., Poltava, 36014, Ukraine
- ⁷ Karpenko Physiko-Mechanical Institute, National Academy of Sciences of Ukraine, 5, Naukova St., Lviv, 79060, Ukraine
- ⁸ Research Institute of Astronomy, V. N. Karazin Kharkiv National University, 35, Sumska St., Kharkiv, 61022, Ukraine

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

Purpose: A historical review of the experimental base development of low-frequency radio astronomy in Ukraine, since its foundation half a century ago by an outstanding scientist S.Ya. Braude to the current state.

Design/methodology/approach: The constant progress of electronic, computer and digital technologies, information and telecommunication technologies, theory and practice of antenna and receiving systems design, which introduction enriched the hardware and methodological ideology of construction and usage of the UTR-2, URAN, and GURT radio telescopes, have been used.

Findings: The worldwide most effective national experimental radio astronomy means, the UTR-2, URAN, and GURT decameter-meter wave radiotelescopes, have been created and improved. The best combination of the systems main parameters: sensitivity; frequency band; spatial, frequency and temporal resolutions; noise immunity; uniformity of amplitude-frequency and space-frequency characteristics and multifunctionality has been provided.

Conclusions: For the half a century of radio astronomical scientific and technical at the Institute of Radio Astronomy

of NAS of Ukraine, the high astrophysical informativeness of the low-frequency radio astronomy and the possibility of creating a highly efficient experimental base – giant radio telescopes of decameter-meter wavebands have been proved. Today, the Ukrainian radio telescopes are well known and recognized world-wide being indispensable and most in demand by the scientific community. The founder of the decameter radio astronomy in Ukraine, the eminent scientist Semen Yakovych Braude was not mistaken when he decided to start radio astronomical explorations. The memory of him will always remain in the minds and hearts of many generations.

Key words: low-frequency radio astronomy, radio telescope, phase shifter, antenna amplifier, digital signal recorder, effective area, sensitivity, resolution, noise immunity

Стаття надійшла до редакції 02.12.2020