

Document Version

Final published version

Licence

CC BY-NC-ND

Citation (APA)

Konovalenko, O. O., Zakharenko, V. V., Ulyanov, O. M., Gurvits, L. I., Vavilova, I. B., Yatskiv, Y. S., Tokarsky, P. L., Stanislavsky, O. O., Kalinichenko, M. M., & More Authors (2026). 70 років НИЗЬКОЧАСТОТНОЇ РАДІОАСТРОНОМІЇ В УКРАЇНІ. *Radio Physics and Radio Astronomy*, 31(2), 75-97. <https://doi.org/10.15407/rpra31.02.075>

Important note

To cite this publication, please use the final published version (if applicable).
Please check the document version above.

Copyright

In case the licence states "Dutch Copyright Act (Article 25fa)", this publication was made available Green Open Access via the TU Delft Institutional Repository pursuant to Dutch Copyright Act (Article 25fa, the Taverne amendment). This provision does not affect copyright ownership.
Unless copyright is transferred by contract or statute, it remains with the copyright holder.

Sharing and reuse

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download, forward or distribute the text or part of it, without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license such as Creative Commons.

Takedown policy

Please contact us and provide details if you believe this document breaches copyrights.
We will remove access to the work immediately and investigate your claim.

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra31.02.075>
УДК 523.164

О.О. Коноваленко¹, В.В. Захаренко¹, О.М. Ульянов¹,
Л.І. Гурвіц², І.Б. Вавилова³, Я.С. Яцків³, П.Л. Токарський¹,
О.О. Станіславський¹, І.М. Бубнов¹, М.М. Калініченко¹,
С.В. Степкін¹, М.А. Сидорчук¹, Є.В. Васильківський¹,
О.М. Резніченко¹, М.В. Шевчук¹, Л.О. Станіславський¹,
С.М. Єрін¹, В.О. Шепелєв¹, В.В. Доровський¹

¹ Радіоастрономічний інститут НАН України
вул. Мистецтв, 4, м. Харків, 61002, Україна

² Факультет аерокосмічної інженерії і Делфтський технологічний університет
1, Клувервег, 2629 HS Делфт, Нідерланди

³ Головна астрономічна обсерваторія НАН України
вул. Академіка Заболотного, 27, м. Київ, 03143, Україна
E-mail: oulyanov@rian.kharkov.ua

70 років НИЗЬКОЧАСТОТНОЇ РАДІОАСТРОНОМІЇ В УКРАЇНІ

Предмет і мета роботи. Статтю присвячено народженню та сімдесяти рокам успішного розвитку низькочастотної радіоастрономії в Україні. Цю діяльність розпочато в середині 50-х років минулого століття видатним вченим, академіком Семеном Яковичем Брауде за максимальної підтримки також унікальної особистості — президента НАН України Бориса Євгеновича Патона. Створення найбільших у світі низькочастотних радіотелескопів та інтерферометрів УТР-2 і УРАН, народження плеяди видатних вчених і широко відомої радіоастрономічної школи довело найвищий світовий рівень вітчизняних фізико-математичних і технічних наук. Метою роботи є історичний і науковий огляд низькочастотної радіоастрономії в Україні та ролі С.Я. Брауде в її заснуванні.

Методи та методологія. Проаналізовано усі етапи створення вітчизняної експериментальної бази радіоастрономії декаметрових-метрових хвиль у порівнянні зі світовим досвідом. Виявлено астрофізичні переваги радіоастрономії низьких частот, методологічні труднощі спостережень у цьому діапазоні та засоби їх подолання. Це зроблено на прикладі створення та використання протягом вже 70 років радіотелескопів УТР-2, УРАН, ГУРТ.

Результати. Створено найбільші в світі низькочастотні радіотелескопи, що є національним науковим надбанням країни. Постійна інноваційна модернізація засобів і методів спостережень дозволила отримати велику кількість пріоритетних результатів, визнаних міжнародною спільнотою, та зробила внесок українських вчених важливою складовою комплексних високочутливих радіоастрономічних досліджень.

Ц и т у в а н н я: Коноваленко О.О., Захаренко В.В., Ульянов О.М., Гурвіц Л.І., Вавилова І.Б., Яцків Я.С., Токарський П.Л., Станіславський О.О., Бубнов І.М., Калініченко М.М., Степкін С.В., Сидорчук М.А., Васильківський Є.В., Резніченко О.М., Шевчук М.В., Станіславський Л.О., Єрін С.М., Шепелєв В.О., Доровський В.В. 70 років низькочастотної радіоастрономії в Україні. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2026. Т. 31. № 2. С. 75—97. <https://doi.org/10.15407/rpra31.02.075>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2026

 Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>)

Висновки. Протягом 70 років низькочастотна радіоастрономія є пріоритетним напрямом досліджень у НАН України. Наукова школа, створена видатним вченим, академіком С.Я. Брауде, є вагомим внеском у вітчизняну астрофізичну науку. Незважаючи на ворожу агресію протягом останніх років, дослідження продовжуються та дають нові результати. Немає сумнівів у післявоєнному відновленні УТР-2 — кращого пам'ятника видатному радіоастроному С.Я. Брауде, і подальшій інтеграції України в світовий науковий простір.

Ключові слова: радіоастрономія, декаметровий діапазон, радіотелескоп, фазована антенна решітка, система фазування, цифрова та аналогова приймальна апаратура.

Вступ

П'ять років тому, у січні–червні 2021 року, наукова громадськість України відзначила ювілейні події в житті вітчизняної астрономічної науки — 110 років від дня народження видатного вченого Семена Яковича Брауде (1911–2003), і 50 років від початку роботи найбільшого у світі радіотелескопа декаметрових хвиль УТР-2, створеного під його керівництвом. Було продемонстровано основні науково-технічні результати більш ніж півстолітньої діяльності, обґрунтовано наступні кроки в розвитку низькочастотної радіоастрономії в Україні та світі. Планувалася подальша модернізація антенно-апаратних комплексів УТР-2 і УРАН, включно з впровадженням цифрового апертурного синтезу узгодженням форматів даних з європейськими системами, нарощуванням секцій радіотелескопа нового покоління ГУРТ.

Керівництво НАН України після відходу в застави Бориса Євгеновича Патона (1918–2020) продовжувало всебічну фінансову та науково-організаційну підтримку радіоастрономічної діяльності в Україні. Ніщо не віщувало подій, які могли б призупинити активний прогрес актуального в усьому світі напряму фундаментальної та прикладної низькочастотної радіоастрономії.

Наступне підбиття підсумків відповідної діяльності передбачалося на початку 2030-х років. Однак реалізацію цих оптимістичних планів було зірвано. У лютому 2022 року неспровокований військовий напад РФ на Україну драматично перевернув життя всієї країни. Всесвітньо відома Радіоастрономічна обсерваторія ім. С.Я. Брауде була практично повністю зруйнована агресором, який до осені 2022 року використовував її територію як військову базу. Однак громадяни країни стійко перенесли цей підступний удар, піднявшись на захист незалежності країни, включно зі збереженням, відновленням і розвитком української науки.

Автори цієї статті вважають за необхідне нагадати про 70-річну історію виникнення та розвитку низькочастотної радіоастрономії в Україні, визначальний внесок С.Я. Брауде в цей процес, висвітлити проведені дослідження й отримані результати, зокрема в драматичних умовах воєнного часу. Це актуально ще й тому, що 28 січня 2026 року виповнилося 115 років від дня народження видатного вченого, фундатора багатьох напрямів науки, відмінного організатора Семена Яковича Брауде — істинного патріота України та Харкова, міста-героя, яке зазнає одних із найсильніших атак ворога, але стійко їх переносить.

1. Початок творчої діяльності С.Я. Брауде

У сучасній всесхвильовій астрономії низькочастотна радіоастрономія, передусім у декаметровому та метровому діапазонах хвиль (частоти 3...30 і 30...300 МГц відповідно), посідає особливе місце. Це пов'язано не лише й не стільки з тим, що радіоастрономія як наука народилася саме в декаметровому діапазоні хвиль на частотах близько 20 МГц понад 90 років тому завдяки американському радіоінженеру Карлу Янському, який відкрив космічне радіовипромінювання. Важливо зазначити, що з початком систематичних радіоастрономічних досліджень космічного випромінювання на гранично низьких частотах, доступних наземним спостереженням, відкрилося принципово нове «вікно» у Всесвіт. Він виявився абсолютно не таким, яким його бачило людство протягом багатьох тисячоліть в оптичному, а потім і у високочастотних радіодіапазонах. Поступово ставали зрозумілими фізичні причини існування незвичних і екзотичних астрофізичних об'єктів і явищ. Зокрема, в радіоастрономії, особливо низькочастотній, переважають численні типи так званих нетеплових механізмів радіовипромінювання: когерентна емісія, випромінювання хвиль і частинок у магнітоактивній плазмі,

а також спостерігається різноманітний вплив холодної та гарячої плазми на поширення низькочастотного радіовипромінювання й тонку структуру спектрів міжзоряних атомів.

Одним із перших, хто адекватно оцінив високу астрофізичну значущість радіоастрономії декаметрових хвиль, був видатний учений, академік Національної академії наук України С.Я. Брауде, багатогранну та плідну наукову діяльність якого висвітлено в роботі¹, а також наведено на сторінках Інтернету [1, 2]. Його внесок у низькочастотну радіоастрономію важко переоцінити, а його вплив на розвиток цього актуального розділу астрономічної науки буде дуже тривалим.

Він народився в інтелігентній сім'ї в Полтаві. Це симпатичне місто й відповідна область у центральній Україні відрізняються своєрідними природним і людським колоритами. До речі, порівняно недавно вулицю поблизу центру Полтави названо його ім'ям. Початок минулого століття в усьому світі був вельми бурхливим, чого не уникала, звичайно, й Україна. Події, що відбувалися, зокрема драматичні, маленький Семен застав і згодом часто згадував. Хоча, ймовірно, у семирічному віці він не усвідомлював, що в 1918 році за Указом гетьмана Скоропадського сталася несподівана подія — було створено Академію наук України, а вся подальша багаторічна творча діяльність Семена Яковича була нерозривно пов'язана з цим відомством.

Його хист до наукової діяльності та жага пізнання проявилися дуже рано. Навчаючись у полтавській школі, він давав уроки математики та фізики дітям, які були не набагато молодші за нього. Не дивно, що після закінчення школи в 1928 році він переїхав до Харкова — вже тоді великого наукового й освітнього центру країни. Вступив на тоді хіміко-фізико-математичний факультет Харківського університету, де навчався, викладав і працював до 1933 року, займаючись різними аспектами радіотехніки та радіофізики, що бурхливо розвивалися в той час. У 1937 році він захистив кандидатську дисертацію, присвячену генерації потужного випромінювання дециметрових радіохвиль.

¹ Konovalenko, A.A., Vavilova, I.B., 2025. Braude Semen Yakovych. In: Nicholson, P.D., Bartlett, J.L. (eds). Biographical Encyclopedia of Astronomers. Springer, New York, NY. DOI: 10.1007/978-1-0716-0738-1_9238-



Академік Семен Якович Брауде — засновник української декаметрової радіоастрономії

Талант молодого вченого було помічено й оцінено в Українському фізико-технічному інституті (УФТІ, нині ННЦ ХФТІ НАН України — Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України) — один із провідних наукових установ країни в галузі теоретичної та ядерної фізики, радіофізики й інших напрямів науки. Багато видатних учених Радянського Союзу працювали в УФТІ, проводячи актуальні теоретичні й експериментальні дослідження та отримуючи пріоритетні результати світового значення. Обдарований Семен Якович легко та природно вписався в цей творчий колектив. Його залучили до розв'язання одного з найважливіших завдань того часу — створення радарів із магнетронними генераторами для виявлення ворожих літаків, що стало актуальним у зв'язку з початком Другої світової війни. Напередодні війни в 1939 році С.Я. Брауде одружився з молодого науковицею, кандидаткою медичних наук Нестеренко Надією Михайлівною, з якою вони прожили довге та щасливе сімейне життя. Згодом в їхній сім'ї народилася дочка Ірина, яка також стала науковицею.

У 1938 році в УФТІ вперше в Радянському Союзі було створено та випробувано трикоординатну радіолокаційну установку дециметрового діапазону «Зеніт». У 1941 році цю установку



Фото 1. Під час експедиції, пов'язаної з натурними експериментами з поширення радіохвиль над морем у рамках виконання НДР “Черемуха” (1948 р., Вентспілс). Ліворуч стоїть С.Я. Брауде

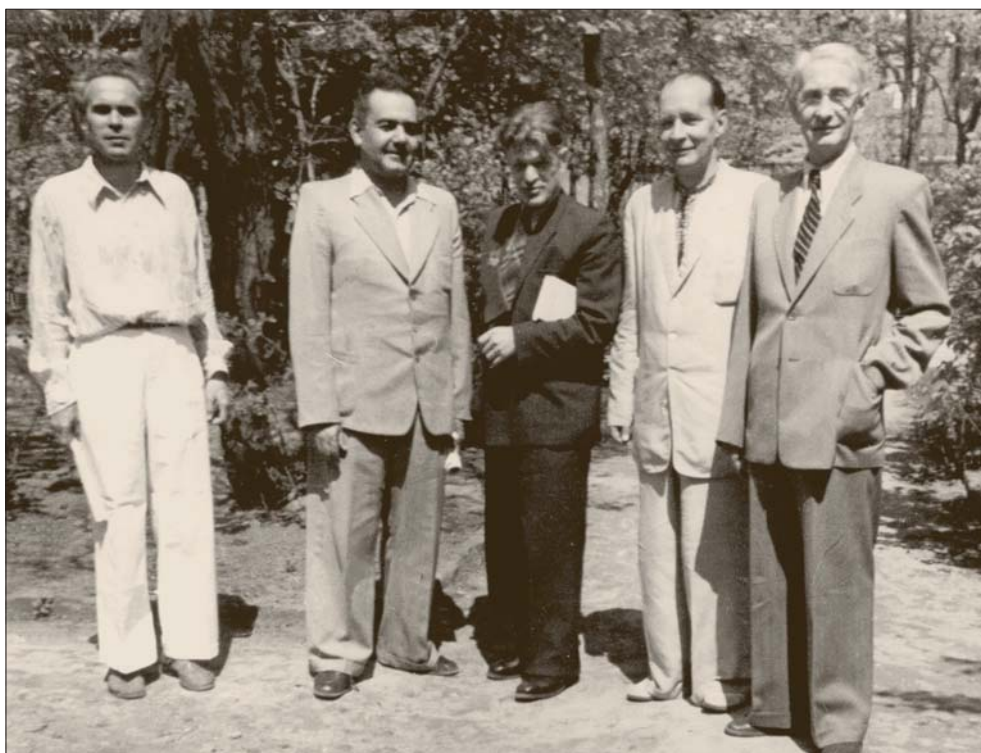


Фото 2. О.Я. Усиков, С.Я. Брауде, А.К. Вальтер, К.Д. Синельников з академіком П.О. Черенковим (у центрі). 1950-ті роки



Фото 3. Заступник директора Інституту радіофізики та електроніки Академії наук України С.Я. Брауде у день свого 50-річчя 28 січня 1961 року. Поруч із Семеном Яковичем сидять Ірина Семенівна (ліворуч) та Надія Михайлівна (праворуч)

було розміщено в м. Митищі й включено в систему ППО Москви. Для забезпечення роботи установки в режимі бойового чергування до Москви було відряджено співробітників УФТІ, зокрема С.Я. Брауде. Деякий час він брав участь у випробуванні установки «Зеніт» у бойових умовах, а надалі з іншими співробітниками та сім'єю був евакуйований до Середньої Азії до міста Бухара.

У 1943 році він захистив докторську дисертацію, присвячену теорії об'ємного заряду в магнетронах, і став завідувачем лабораторії ХФТІ. Його подальша наукова та педагогічна діяльність була вельми плідною. Однак у 1947 році проявилася його чергова творча якість — бажання періодично змінювати поле наукової діяльності.

Продовжуючи працювати в ХФТІ, він ініціював комплексні роботи з дослідження поширення радіохвиль різних діапазонів у різних середовищах. Одним із найцікавіших напрямів, що дав багато несподіваних фундаментальних і прикладних результатів, було вивчення поширення радіохвиль над морською поверхнею (фото 1). Результати виявилися настільки важливими, що відповідні теорії та експерименти було сформульовано як новий науковий напрям у радіофізиці та геофізиці — радіоокеанографія. Цей напрям, очолюваний С.Я. Брауде, привів до присудження Державної премії СРСР у 1952 році, зробив його одним із лідерів радіофізичної науки в країні. У 1955 році в Харкові було створено новий інститут Академії наук України — Інститут радіофізики та електроніки (ІРЕ, зараз він носить ім'я

О.Я. Усикова, який був першим директором інституту) (фото 2). А сам С.Я. Брауде став заступником директора з наукової діяльності цього інституту (фото 3).

2. Створення та розвиток радіоастрономії в Україні

Незважаючи на тріумфальний поступ у розвитку радіофізики та електроніки як нового інституту, так і самого Семена Яковича, він знову вирішив різко змінити напрям своєї діяльності. Неочікувано для багатьох він звернувся до молоді тоді науки — радіоастрономії (їй на той час виповнилося трохи більше 20 років), причому саме до наземних спостережень космічного радіовипромінювання на найнижчих частотах, досяжних із земної поверхні. Звісно, головною причиною такого переходу, насамперед, була властива йому впродовж усього життя жага творчості в найрізноманітніших напрямках радіоелектроніки та фізичної науки загалом. Однак не можна виключити і його бажання відійти від «військової» та «напіввійськової» таємної діяльності, до того ж грубо контролюваної комуністичною партією та КДБ. С.Я. Брауде був волелюбною, творчою, високоінтелектуальною особистістю. Тож він, безумовно, страждав від тиску контролюючих органів, справедливо вважаючи, що радіоастрономія дозволить уникнути подібного. Це загалом багато в чому підтверджувалося, але, на жаль, не завжди...



Фото 4. Перший в Україні тестовий 24-елементний радіотелескоп декаметрових хвиль ІД-1

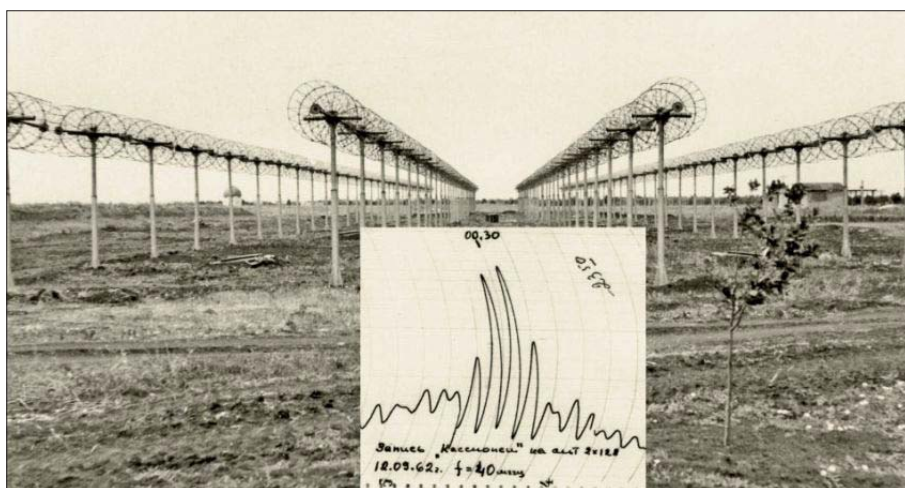


Фото 5. Короткобазовий інтерферометр — 2×128 -елементна антена діапазону 20...40 МГц, яку було створено на початку 1960-х років. Внизу в центрі наведено запис радіоджерела Cas A, який зроблено за допомогою чорнильного самописця

Рівно 70 років тому в ІРЕ він створив два радіоастрономічні відділи — «Декаметрова радіоастрономія» і «Радіотелескопи та інтерферометри», зібрав колектив висококваліфікованих наукових співробітників, інженерів і техніків, організував розробку та виготовлення низькочастотних радіотелескопів нового покоління.

Глибока фізична й астрофізична інтуїція, а також відомі факти та теоретичні оцінки переконали його у високій астрофізичній інформативності низькочастотної радіоастрономії. З іншого боку, він розумів істотні проблеми досліджень на цих частотах — низьку кутову роздільну здатність (велике відношення довжини хвилі до розміру апертури), численні інтенсивні радіозавади різних типів, негативний вплив середовища поширення радіохвиль (міжзоряне та

міжпланетне середовища, іоносфера). Саме тому в ті роки в усьому світі найбільш бурхливо почала розвиватися радіоастрономія міліметрових, сантиметрових, дециметрових хвиль, де таких проблем було значно менше. Наявні у світі непогані низькочастотні радіотелескопи не відповідали повною мірою суперечливим вимогам. Тож, С.Я. Брауде з колегами вирішили по-новому підійти до освоєння низькочастотного діапазону, усвідомлюючи, що ефективний радіотелескоп треба будувати на нових принципах. Вони обґрунтували, що майбутній низькочастотний радіотелескоп має забезпечувати такі параметри й особливості: великі лінійні розміри (>1 км); достатньо високу кутову роздільну здатність ($<1^\circ$); гігантську ефективну площу ($>10^5$ м²); широкий діапазон частот (не менше 10...25 МГц); високу



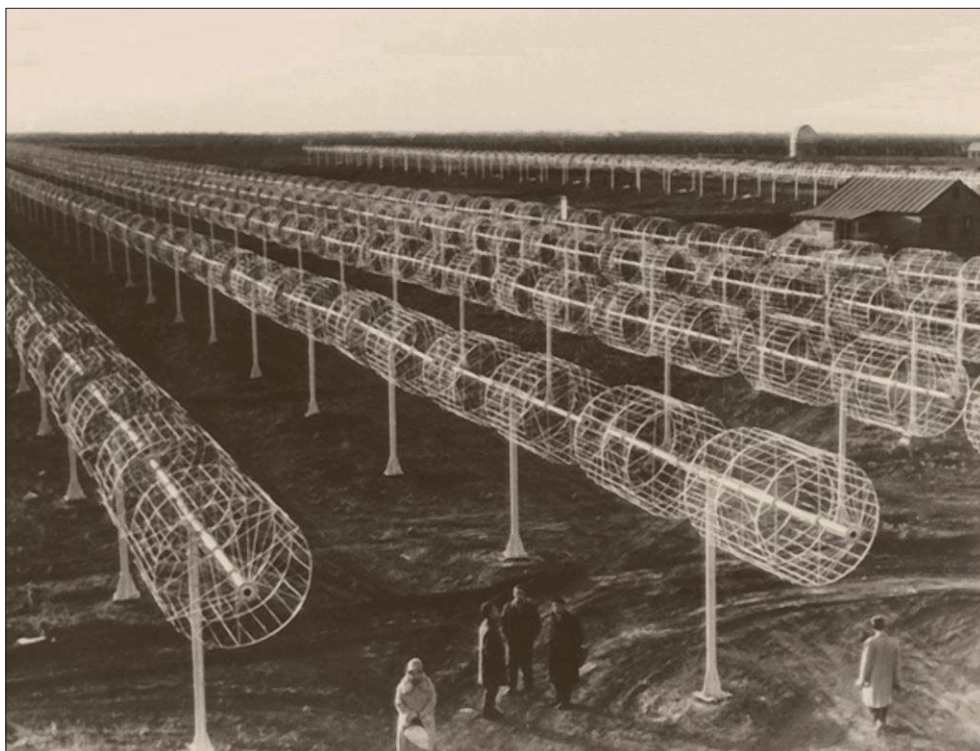
Фото 5. С.Я. Брауде (праворуч) зі співробітниками на будівництві радіотелескопа УТР-2. 1960-ті роки

завадостійкість і динамічний діапазон; електронне керування променем у широкому секторі зенітних кутів ($>\pm 70^\circ$); багатопроменевість і/або апертурний синтез; узгодження чутливості та роздільної здатності в оптимальній конфігурації; максимальне заповнення UV-площини; багатофункціональність і гнучкість конфігурації; ремонтпридатність, швидке та надійне керування, контроль і калібрування.

Для перевірки цих ідей із 1950-х до кінця 1960-х років С.Я. Брауде з однодумцями організували Радіоастрономічну обсерваторію (зараз вона носить його ім'я) за 70 км на південний схід від Харкова площею близько 140 га та побудували кілька поколінь тестових фазованих антенних решіток. (фото 4 та 5). Це привело до створення на початку 1970-х років під керівництвом С.Я. Брауде, на той час вже академіка Академії наук України, найбільшого у світі радіотелескопа УТР-2 (Український Т-подібний Радіотелескоп-2 модифікація фото 6 та 7). Не можна не згадати з вдячністю президента Академії наук України Бориса Євгеновича Патона (1918–2020), який, починаючи з 1962 року і до останніх днів свого яскравого життя всебічно підтримував розви-

ток низькочастотної радіоастрономії в Україні та у світі.

Вже одразу після початку роботи УТР-2 (фото 8 та 9) С.Я. Брауде ініціював і організував ще низку нетривіальних наукових і науково-організаційних дій — залучив до роботи на УТР-2 велику групу молодих співробітників, запропонував створення мережі радіоінтерферометрів із наддовгими базами (РНДБ) на найнижчих частотах, доступних для спостережень із поверхні Землі, а також нової радіоастрономічної організації в системі Академії наук України. Річ у тім, що УТР-2 створювався на радіотехнічних принципах 1950-х—1960-х років. Уся приймально-реєструвальна апаратура була суто аналоговою, застосовувалися електронно-вакуумні прилади, чорнильні самописці, найпростіші лічильні засоби. Нове покоління співробітників — випускників харківських вищих навчальних закладів — уже добре знало й застосовувало комп'ютери, цифрову, напівпровідникову та мікросхемотехніку, нову теорію та техніку антен і приймальних систем, сучасні методи обробки сигналів. Розпочата близько 50 років тому глибока модернізація УТР-2 успішно триває й донині.



а



б

Фото 7. УТР-2 у різні роки. Антенні системи радіотелескопів УТР-2 і УТР-1. 1960-ті роки (а). Північне, західне та південне плечі радіотелескопа УТР-2. Погляд з квадрокоптера, 2020 р. Загальний розмір Т-подібної конфігурації $\sim 2 \times 1$ км; максимальна ефективна площа $\sim 150\,000$ м²; діапазон частот: 10...25 МГц (раніше), 5...40 МГц (зараз) (б)

Одним із головних обмежень низькочастотної радіоастрономії була порівняно низька кутова роздільна здатність навіть для такого гігантського телескопа, як УТР-2. С.Я. Брауде чітко розумів, що вихід — лише в застосуванні методології РНДБ, і організував відповідні роботи зі створення системи УРАН (Український Радіоінтерферометр Академії Наук). Крім того, він обґрунтовано вважав, що подальший розвиток фундаментальної радіоастрономії можливий лише в новій академічній організації — Радіоастрономічний обсерваторії або новому інституті. Цю ідею підтримали Б.Є. Патон і видатні радіоастрономи зі США, Австралії, Індії, Франції, СРСР, які, починаючи з середини 1970-х років, здійснювали численні візити до обсерваторії УТР-2.

На жаль, абсурдна політика керівництва СРСР не допустила С.Я. Брауде стати директором створюваної установи. Це відкинуло розвиток низькочастотної радіоастрономії в Україні назад на певний період часу. Проте прогрес вітчизняної науки в цій галузі мав місце завжди. У 1987 році С.Я. Брауде став радником при дирекції Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України (ІН НАНУ), створеного в 1985 році, де продовжував займатися наукою. Він підтри-



Фото 8. Семен Якович Брауде разом із президентом НАН України Борисом Євгеновичем Патоном на оглядовому майданчику обсерваторії УТР-2 (04.06.1971)



Фото 9. Виїзна сесія відділення фізики і астрономії АН УРСР в обсерваторії УТР-2. С.Я. Брауде та Б.Є. Патон (4-й і 5-й зліва) з членами Президії Академії наук України під час офіційного введення в дію радіотелескопа УТР-2 (04.06.1971)

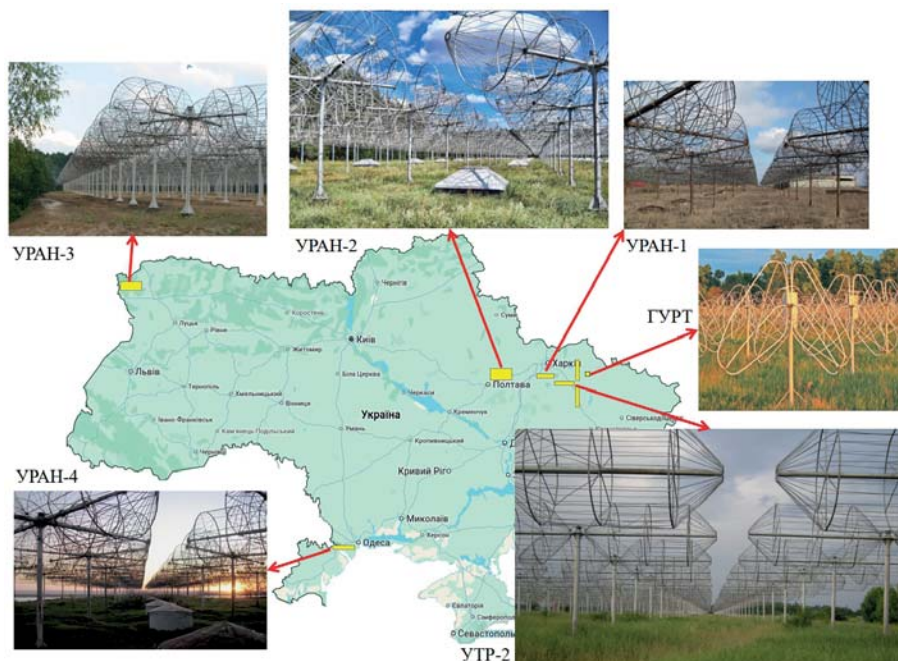


Фото 10. Розташування радіотелескопів декаметрових хвиль на території України (біля кожного пункту розміщено знімок відповідного радіотелескопа)

мував усі нові ідеї модернізації існуючих радіотелескопів, створення нових, перспективних методів і програм спостережень, сприяв розвитку активного міжнародного співробітництва.

Складно перелічити всі результати, отримані при вивченні Сонячної системи, Галактики та Метагалактики за допомогою радіотелескопів УТР-2, УРАН-1...УРАН-4, інструмента нового покоління ГУРТ (фото 10 та 11).

Коротко нагадаємо основні астрофізичні досягнення С.Я. Брауде [3–5] та його колег² про

² Braude, S.Ya., Rashkovsky, S.L., Sidorchuk, K.M., et al., 2002. Decametric survey of discrete sources in the Northern sky. *Astron. Space Sci.*, 280(3), pp. 235–300.

Konovaleiko, O.O., Zakharenko, V.V., Lytvynenko, L.M., et al., 2021. The founder of decameter radio astronomy in Ukraine: Academician of the NAS of Ukraine Semen Yakovych Braude is 110 years old: History of the creation and development of the national experimental base for the last half century. *Radio Phys. Radio Astron.*, 26(1), pp. 5–73. DOI: 10.15407/rpra26.01.005

Konovaleiko, A.A., Sodin, L.G., Zakharenko, V.V., et al., 2016. The modern radio astronomy network in Ukraine: UTR-2, URAN and GURT. *Exp. Astron.*, 42(1), pp. 11–48. DOI: 10.1007/s10686-016-9498-x

Zakharenko, V., Konovaleiko, A., Zarka, P., et al., 2016. Digital receivers for low-frequency radio telescopes UTR-2, URAN, GURT. *J. Astron. Instrum.*, 5(4), 1641010. DOI: 10.1142/S2251171716410105

тягом останнього півстоліття, а саме: виявлення та каталогізація кількох тисяч позагалактичних радіоджерел із визначенням їхніх спектрів у діапазоні 10...25 МГц; визначення кутової структури вибірки радіогалактик і квазарів із роздільною здатністю порядку одиниць кутових секунд (гранично високою для РНДБ на декаметрових хвилях) і виявлення відмінностей від зображень цих джерел на сантиметрових хвилях; високочутливі спостереження й аналіз тонких частотно-часових структур усіх типів спорадичного радіовипромінювання Сонця і Юпітера; виявлення абсорбційних рекомбінаційних радіоліній рекордно високо-збуджених станів міжзоряних атомів вуглецю та водню з головними квантовими числами до 1000; перші спостереження декаметрової імпульсної радіоemisії близько 70 пульсарів, включаючи детектування індивідуальних імпульсів, і більш ніж 400 радіоджерел транзйентного випромінювання; наземне виявлення радіовипромінювання від електростатичних розрядів в атмосфері Сатурна; картографування кількох десятків емі-

Tokarsky, P.L., Konovaleiko, 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.*, 67(12), pp. 7312–7319. DOI: 10.1109/TAP.2019.2929322

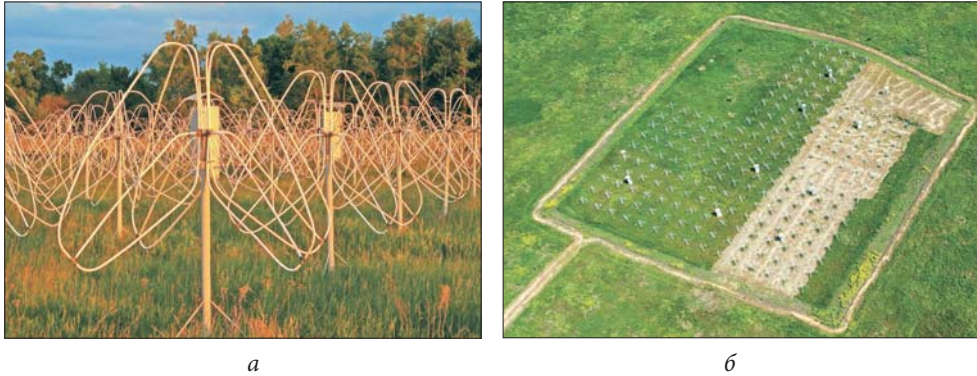


Фото 11. Радіотелескоп нового покоління ГУРТ: зовнішній вигляд антенних решіток (а); загальний вигляд радіотелескопа з висоти пташиного польоту (б)



Фото 12. Спільна команда французьких і українських науковців біля радіотелескопа NenuFAR під час візиту на обсерваторію Нансе (Франція, 2019 рік)



Фото 13. Учасники святкування 50 річчя з початку роботи найкрупнішого в світі радіотелескопа УТР-2 (червень 2021 р.)

сійних туманностей (вони проявляються в поглинанні на декаметрових хвилях) і залишків наднових, включаючи реліктові зони поглинання на їхній периферії.

Нинішнє покоління послідовників С.Я. Брауде, яке створило радіотелескопи нового типу, такі як ГУРТ і NenuFAR (фото 12 та 13), ніколи не забуває його визначальний внесок у створення та



Фото 14. До та після російської окупації обсерваторії ім. С.Я. Брауде. Основний зал управління радіотелескопа УТР-2 (ліворуч зверху та знизу) та обчислювальний центр УТР-2 (праворуч зверху та знизу). Бачимо наслідки

розвиток низькочастотної радіоастрономії, блискучий талант ученого, організаційний напір, чудові людські якості.

Розпад СРСР у 1991 році він сприйняв адекватно. Як і переважна більшість українців (маються на увазі україномовні, російськомовні громадяни, носії будь-яких інших мов багатонаціональної доброзичливої України), він розумів безперспективність і нелюдяність внутрішньої та зовнішньої політики СРСР, яка, на жаль, в утримуваному вигляді перейшла до деяких інших диктаторських країн. Безперечно, він із подивом і обуренням сприйняв би розв'язування РФ війни проти України, зокрема руйнування головного дітища його наукової діяльності — найбільшого у світі радіотелескопа декаметрових хвиль УТР-2, який бездоганно пропрацював 50 років.

3. Радіоастрономічні дослідження у воєнний час

Незважаючи на повне руйнування й розграбування лабораторної будівлі та центральних підземних колекторів радіотелескопа УТР-2, а також усієї інфраструктури обсерваторії (фото 14),

ворогу не вдалося знищити радіоастрономію в Україні. У цих драматичних умовах співробітники РІ НАНУ розробили нову програму, яка дозволяє не лише зберегти величезний науковий потенціал, а й забезпечити його перспективний розвиток. Цьому сприяють висока кваліфікація, ентузіазм і сміливість співробітників, підтримка керівництва НАН України та світової радіоастрономічної спільноти (фото 15 та 16).

Спеціально виділені кошти дозволили частково відновити елементи інфраструктури обсерваторії. Виграні наукові конкурси НАН України, Національного фонду досліджень України (НФДУ), Українського науково-технологічного центру (УНТЦ), грантової програми Horizon — Europe дозволили продовжувати експериментальні та теоретичні дослідження на високому рівні. Основні напрями діяльності полягають у такому:

- обробка величезної збереженої бази експериментальних даних УТР-2 (її обсяг становить сотні терабайтів, вона містить унікальну інформацію, отриману з рекордними параметрами вимірювань);

- максимально активне застосування всіх уцілілих радіотелескопів УРАН-1...УРАН-4 і субрешиоток ГУРТ: маються на увазі як незалежні



Фото 15. Олександр Коноваленко, Вячеслав Захаренко, Михаэль ван Харлем, Віолетта Імпелліццери, під час робочої зустрічі, яка відбулася під егідою МАС (Міжнародний астрономічний союз) і була присвячена повоєнному відновленню астрономічної інфраструктури України (Нідерланди, антенне поле LOFAR, червень 2025 р.)



Фото 16. Учасники спеціалізованої наради Міжнародного астрономічного союзу, присвяченої обговоренню програми відновлення астрономії в Україні у повоєнний період (Нідерланди, Лейден, червень 2025 р.)

вимірювання, так і координоване одночасне розв'язання низки актуальних астрофізичних задач (концепція «десять в одному»);

- формулювання та розв'язання нових спостережних задач із застосуванням найкращих світових систем нового покоління LOFAR, NenuFAR, LWA, а також космічних місій Juno, Parker Solar Probe, Solar Orbiter тощо.

За чотири роки російсько-української війни виконано великий обсяг інженерно-технічних розробок, експериментальних досліджень, комп'ютерної обробки даних, написання статей і створення презентацій. Захищено дві кандидатські дисертації та підготовлено 4 докторські. Отримано премію ім. С.Я. Брауде НАН України та Міжнародного астрономічного союзу, гранти ERASMUS (Нідерланди). Опубліковано близько 100 статей в авторитетних фахових виданнях і доповідей на конференціях. Направлено до друку колективну монографію «Радіовипромінювання Всесвіту на декаметрових хвилях». Нижче стисло сформульовано в узагальненому вигляді деякі з отриманих за останні роки результатів:

- Розроблено й випробувано в лабораторних і натурних (на радіотелескопі УРАН-2) умовах цифровий реєстратор нового покоління DSP-U з істотним поліпшенням усіх параметрів: максимальна смуга — 40 МГц; частотна роздільна здатність $\sim 0,1$ кГц; часова роздільна здатність ~ 1 мс; розрядність АЦП 16 біт. Можлива реєстрація амплітудних автоспектрів, амплітудних і фазових крос-спектрів, а також безпосереднього сигналу в цифровому вигляді (*wave-form*) у всій смузі аналізу.

- Введено й випробувано широкосмугові цифрові приймачі з АЦП і сучасною архітектурою для комплексного застосування на радіотелескопах УРАН-1 і УРАН-4 як доповнення до наявних раніше вузькосмугових радіоприймачів.

- Дві субрешітки ГУРТ перебазовано в більш безпечне місце — в обсерваторію УРАН-2 (Полтавська обл., яка є батьківщиною С.Я. Брауде), адаптовано широкосмугові цифрові реєстратори ADR зі смугою 0...80 МГц. Запропоновано ідею створення та застосування малорозмірних мобільних антен-решіток для розв'язання багатьох задач низькочастотної радіоастрономії із забезпеченням електроживлення на основі сучасних сонячних електростанцій [6].

- Проведено нові розрахунки всіх параметрів низькочастотних антенних решіток з урахуванням особливостей їхніх конструкцій і застосуванням аналітичних теорій багатополісників і матриць, а також сучасних чисельних електродинамічних методів (програма NEC-4). Це підвищило точність визначення енергетичних параметрів антен, густин потоків і яскравісних температур космічних радіоджерел і дозволяє коректно розширити діапазон антен у бік високих і низьких частот [7].

- Розвинено й апробовано методологію оглядових низькочастотних спостережень на радіотелескопах УРАН-1 (РІ НАНУ, Харків), УРАН-2 (ІГО ІГФ НАНУ, Полтава), УРАН-3 (ФМІ НАНУ, Львів), УРАН-4 (РІ НАНУ, Харків) і обробки попередніх даних УТР-2 (РІ НАНУ, Харків) у межах реалізації концепції «десять в одному», яка забезпечує одночасне вивчення різних астрофізичних об'єктів із континуальним, просторово-залежним, монохроматичним, імпульсним, спорадичним, поляризованим типами космічного радіовипромінювання.

- Вивчено особливості наземної радіоастрономії гранично низьких частот і можливу реалізацію нового повного огляду північного неба на декаметрових і метрових хвилях, зокрема за допомогою вітчизняних радіотелескопів [8]. Продемонстровано можливість вивчення різних типів астрономічних об'єктів; розподіл радіозавад у часі, просторі та за частотою; значення частоти іоносферної відсічки (3...4 МГц у нічний час і 6...7 МГц удень); детектування нового типу широкосмугових радіозавад, пов'язаних із грозовими розрядами в тропіках. Цю частину діяльності узгоджено з нідерландськими радіоастрономами — учасниками проекту LOFAR (ASTRON, Dwingeloo, Нідерланди), готується спільна публікація. Завдяки унікальній високочутливій методології, описаній у двох попередніх параграфах, у період 2022—2026 років вже вивчено нові об'єкти й особливості випромінювання, які дали, зокрема, такі результати:

- Зареєстровано лінії міжзоряного вуглецю високозбуджених атомів ($n > 600, f < 30$ МГц) у недосліджених раніше областях Галактики, зокрема для вельми великих широт $b > 5^\circ$, що свідчить про великий об'єм холодної частково-іонізованої плазми в галактичних рукавах.

- За допомогою спостережень радіорекомбінаційних ліній вищих порядків ($\alpha, \beta, \gamma, \delta, \epsilon$ -переходів) поблизу частоти 30 МГц виявлено рекордно високі стани міжзоряних атомів $n \approx 1035$.

- Виявлено незвичну зону поглинання неперервного випромінювання фону поблизу площини Галактики, яка, однак, не ототожнюється з відомими областями НІІ, а, ймовірно, являє собою зону холодної частково-іонізованої міжзоряної плазми. Вона не може спостерігатися жодними іншими відомими методами астрофізики. Спільна інтерпретація даних за низькочастотним континуумом і радіо-рекомбінаційними лініями дає новий унікальний метод діагностики міжзоряної плазми. Крім того, підтверджується наявність нової значної популяції галактичного населення — об'єкт «негативної» полярності (низькочастотні рекомбінаційні лінії поглинання, континуальне поглинання в гарячій і холодній плазмі, сплески поглинання в спорадичному випромінюванні Сонця та Юпітера тощо).

- Зареєстровано 20 нових для декаметрових хвиль пульсарів (загальна кількість детектованих пульсарів на декаметрових хвилях є близькою до 70), з істотним уточненням їхньої міри дисперсії, детектуванням тонкої структури окремих імпульсів. Вивчення дисперсійної затримки імпульсів у міжпланетному середовищі відкриває новий метод діагностики навколосонячної плазми. Рекордна чутливість УТР-2 дозволила задетектувати більше ніж 400 транзєнтів³ (джерел спорадичного радіовипромінювання, невідомого раніше на низьких частотах).

- Уперше на частотах менше 30 МГц зареєстровано випромінювання галактики NGC 3521. Джерело відсутнє в попередньому каталозі УТР-2, однак нова ширококуткова методика спостережень і обробки даних дозволили істотно підвищити чутливість. Густина потоку становить ~ 10 Ян, що підтверджує її подібність до нашої Галактики.

- В процесі більш ніж 30-річного співробітництва між Францією та Україною в галузі низькочастотної радіоастрономії, включно з виконанням національних і міжнародних проєктів

INTAS, ANR, PICS, досягнуто величезного прогресу в галузі створення нових апаратно-методичних засобів і отримання нових астрофізичних результатів. Застосування інструмента нового покоління NenuFAR, який створено за участю українських фахівців, дозволило зробити низку нових відкриттів. Так, після 2022 року спільні експерименти дозволили виявити широку серію рекомбінаційних ліній у діапазоні 10...70 МГц для джерел Cas A, Syg A, Tau A, запропоновано нові високоефективні методи спостережень, обробки експериментальних даних і астрофізичної інтерпретації отриманих результатів.

- Реалізовано ідею багатоантенних (близько 50 інтерферометрів із двох субрешіток, одна субрешітка складається з 19 антенних елементів) спостережень залишків наднових Cas A, Tau A та ін. на радіотелескопі NenuFAR. Це істотно підвищило точність визначення змін густин потоку і спектрів випромінювання (близько 1% за місяць спостережень) при використанні порівняння з випромінюванням радіогалактики Syg A. Одночасно неочікувано виявлено «швидкі» мерехтіння випромінювання Cas A і Syg A (період ~ 1 с), що інтерпретовано нетиповими особливостями іоносферної плазми, зумовленими сонячною активністю⁴.

- Зроблено теоретичні оцінки та запропоновано методику пошуку важливого космологічного ефекту — лінії нейтрального гідрогену⁵, яка завдяки червоному зміщенню має з'являтися на декаметрових хвилях (~ 16 МГц). Методологія враховує вкрай низьку інтенсивність лінії, велику ширину, вплив вузькосмугових і ширококутних радіозавад, крайові ефекти. Продемонстровано можливості застосування українських радіотелескопів як у майбутніх експериментах, так і під час нової обробки вже отриманих раніше даних, а також у ході перспективних космічних місій на зворотному боці Місяця.

⁴ Stanislavsky, A.A., Bubnov, I.N., Stanislavsky, L.A., et al., 2026. NenuFAR observations of scintillation during high solar activity. In: Planetary, Solar and Heliospheric Radio Emissions X.L. Lamy, C.K. Louis, G. Fischer, D. Morosan, P. Zarka eds. OSU Pythéas/AMU, Observatoire de Paris. Preprint. DOI: 10.25935/prex-77fv

⁵ Konovalenko, O., Zakharenko, V., Novosyadlyj, B., et al., 2024. On the Possibility of Detecting a Global Signal in the Line of the Hyperfine Structure of Hydrogen from the Dark Ages. J. Phys. Stud., 28(1), 1902. DOI: 10.30970/jps.28.1902

³ Zakharenko, V.V., Kravtsov, I.P., Vasylieva, I.Y., et al. 2026. The UTR-2 decametre pulsar and transient survey. I. Transient detection. Astron. Astrophys., 708(A4). DOI: 10.1051/0004-6361/202555029

• Теоретично й експериментально проаналізовано та переглянуто оцінки фундаментальних обмежень чутливості низькочастотних радіотелескопів УТР-2, УРАН, ГУРТ. Показано нові потенційні можливості, які у 5–10 разів кращі, ніж вважалося в попередні 50 років існування вітчизняної радіоастрономії.

Як видно, незважаючи на форс-мажорні обставини останніх років, радіоастрономічні дослідження в Україні тривають і колектив співробітників не збирається зупинятися на досягнутому.

4. Програма інноваційного відновлення радіотелескопа УТР-2

4.1. Особливості радіотелескопа УТР-2, важливі для його застосування в майбутньому

Повне відновлення всесвітньо відомої обсерваторії ім. С.Я. Брауде з унікальними радіотелескопами УТР-2 і ГУРТ можливе лише після успішного завершення війни. Проте вже зараз розпочато підготовку програми цього безпрецедентного науково-технічного та науково-організаційного заходу. Можливість і доцільність його проведення є очевидними не лише для українських вчених, а й для світової радіоастрономічної спільноти.

Радіотелескоп УТР-2, створений понад півстоліття тому, досі має низку унікальних особливостей [9, 10], серед яких, в першу чергу, слід зазначити такі. Він має гігантську миттєву ефективну площу, яка складає приблизно 150 000 кв. м, що зосереджена на ділянці розмірами 2×1 км. Фазована антенна решітка зі щільно заповненою апертурою, що в ньому використовується, мінімізує діапазон частот, в якому можуть з'являтися дифракційні промені в її діаграмі спрямованості. Застосування ідеї Т-подібного кореляційного радіотелескопа великого розміру дає можливість досягти досить високої кутової роздільної здатності — близько 30 кутових хвилин у середині діапазону 10...25 МГц. До того ж така конфігурація радіотелескопа дозволила узгодити його чутливість з роздільною здатністю, а також забезпечити не менш важливу особливість низькочастотного радіотелескопа — майже повне миттєве заповнення площини просторових частот прийнятого сигналу.

Відомий недолік кореляційних радіотелескопів — відсутність низьких просторових частот, включаючи нульову, можна легко компенсувати шляхом використання гнучкості конфігурації УТР-2 (можлива реєстрація сигналів від окремих антен, зокрема антенних решіток Північ–Південь і Схід–Захід, а також їх частин — секцій) і впровадженню сучасних кінцевих приймальних пристроїв (*back-end*), призначених для обробки, реєстрації та збереження прийнятих сигналів. До того ж ці пристрої можуть визначати амплітудні й фазові автосpektри та крос-спектри сигналів, які надходять від окремих антен або їхніх складових. Це суттєво підвищує надійність ідентифікації корисних сигналів на тлі земних перешкод, а також завад, що йдуть від інших космічних радіоджерел, за рахунок зниження рівня ефекту сплутування (*confusion effect*).

Широкий діапазон частот радіотелескопа (спочатку 10...25 МГц) також важливий для досягнення ним високої чутливості, високої стійкості до завад і можливості вивчення ширококутових спектрів радіовипромінювання позаземних джерел. Зазначимо, що на найнижчих частотах (~ від 5 до 30 МГц) УТР-2 залишається найбільш чутливим (за густиною потоку прийнятих сигналів) інструментом у сучасній радіоастрономії завдяки своїй гігантській ефективній площі. Легко довести, що УТР-2 дає рекордну флуктуаційну чутливість $\Delta S_{\min} \approx 5$ Ян у разі вивчення з високими часовою (~1 с) та частотною (~10 кГц) роздільними здатностями швидкозмінних і вузькосмугових процесів (Сонце, Юпітер, Сатурн, пульсари, спектральні лінії).

За відсутності обмежень на тривалість некогерентного накопичення, смугу частот реєстрації та за відсутності ефекту сплутування (континуум, накопичення великої серії імпульсів пульсарів і рекомбінаційних ліній) чутливість УТР-2 складе близько одиниць міліянських. Сучасна система розподіленого багатоярусного антенного підсилення, впроваджена в цьому радіотелескопі, має великий динамічний діапазон, необхідний для безспотворювального приймання сигналів, і високу завадостійкість вимірювань. Крім цього, вона забезпечує значне перевищення антенної температури галактичного фону над власними шумами приймальної системи, яке становить близько ~6...15 дБ, що дозволяє отримати чут-

ливисть радіотелескопа (за яскравістю), близьку до максимальної. Слід також наголосити, що для успішного проведення більшої частини астрофізичних досліджень треба мати радіотелескоп із гігантською ефективною площею (пульсари, активні зірки, екзопланети, спектральні лінії тощо). Тому для розв'язання подібних задач УТР-2 був і дотепер залишається одним із ключових інструментів, що далеко не вичерпав своїх можливостей.

Електронне керування променем УТР-2 в широкому секторі ($\pm 70^\circ$ від зеніту) і його багатопроменевість (п'ять одночасно існуючих променів, рознесених по куту місця на 0.5°) дозволяють здійснювати довготривалий супровід джерел по небу під час обертання Землі, що збільшує час накопичення сигналу й, тим самим, підвищує флуктуаційну чутливість, скорочує час огляду та уможливорює ON-OFF режим заради надійної ідентифікації сигналів. Розроблена близько 50 років тому система дискретного фазування з ярусним асинхронним керуванням променем забезпечує квазі-миттєве та безперервне перемикання й мінімальну кількість комутуючих елементів. Використані в ній двійково-дискретні фазообертачі з фіксованим фазовим центром переводять двійковий код у код Грея, де кожний наступний напрямок променя вимагає лише одного перемикання. Такі фазообертачі є економічними та надійними, вони забезпечують задану точність наведення променів і не створюють множинних імпульсних завад. Механічна міцність сталевих антенних елементів — шунтових диполів УТР-2 (2040 шт.) та їхній конструктивно обумовлений грозозахист гарантують надійність, довговічність і ремонтпридатність антенної решітки.

Перелічені позитивні якості УТР-2 підтверджено більш ніж 50-річним його застосуванням у практично щоденних спостереженнях, які дозволили отримати багато пріоритетних астрофізичних і науково-технічних результатів. Більше того, значну частину цих результатів отримано в ході тісного міжнародного співробітництва з науковими установами та науковцями Франції, Нідерландів, Австрії, Німеччини, Великої Британії, США, Індії, Японії, Латвії, Польщі, Болгарії. Особливо цікавим є застосування УТР-2 та інших українських радіотелескопів у синхронних

спостереженнях з іншими світовими інструментами, рознесеними на сотні й тисячі кілометрів. Така багатоантенна синергія підвищує чутливість і надійність вимірювань на тлі радіозавад та іоносферних мерехтінь. Крім того, перспективним є застосування найбільш віддалених у бік сходу Європи УТР-2 і УРАН, що підвищить кутову роздільну здатність РНДБ-систем LOFAR [11] + LOFAR-Europe + NenuFAR [12] з базою порядку 1000 км за рахунок збільшення максимальної бази до 2000...3000 км. Безумовно, зазначені якості слід не лише зберегти в процесі майбутнього відновлення УТР-2, а й істотно розвинути їх, враховуючи сучасний рівень науки й техніки, а також світовий досвід створення радіоастрономічних інструментів нового покоління.

Сказане вище демонструє можливість, доцільність і актуальність для світової низькочастотної радіоастрономії відновлення радіотелескопа УТР-2. Природно, це має бути зроблено на принципово нових якісному й кількісному рівнях. Як зазначалося раніше, ідеологія, архітектура, конструкція власне фазованої антенної решітки УТР-2 і досі вражає досконалістю науково-технічних підходів. Однак у зв'язку з рівнем техніки 1950-х — 1960-х років уся радіоелектронна апаратура була аналоговою, включно з найголовнішою частиною — системою фазування на основі електромеханічних (релейних) комутованих ліній часової затримки (радіочастотних коаксіальних кабелів) загальною довжиною в десятки кілометрів. Це істотно обмежувало унікальний потенціал антенно-апаратного комплексу УТР-2. Звичайно, розпочата близько 50 років тому модернізація, особливо приймально-реєструючої частини (*back-end*) та спостережної методології загалом, істотно покращили експлуатаційні параметри, що дало можливість отримати стисло описані вище результати, включно з отриманими вже під час війни. Але нині пропонується принципово новий підхід у повоєнному відновленні та подальшій модернізації УТР-2. Значною мірою він ґрунтується на досвіді створення радіотелескопів LOFAR (Нідерланди) і NenuFAR⁶ (Франція).

⁶ Zarka, P., Tagger, M., Denis, L., et al., 2015. NenuFAR: Instrument description and science case. In: Proc. 2015 Int. Conf. Antenna Theory Tech.: Dedicated to 95 Year Jubilee of Prof. Y.S. Shifrin (ICATT 2015). 7136773. DOI: 10.1109/ICATT.2015.7136773

У цих нових інструментах знайшли застосування найсучасніші інформаційні та телекомунікаційні технології, забезпечено широкий діапазон частот, високі чутливість і роздільну здатність, велике поле зору, вражаючи можливості високоякісного картографування. Далі стисло описано основні ідеї та необхідні кроки для підготовки й реалізації програми відновлення УТР-2.

4.2. Основні ідеї та кроки для підготовки реалізації програми відновлення УТР-2

- Головна ідея майбутньої модернізації УТР-2 під час його повоєнного відновлення полягає у впровадженні режиму цифрового апертурного синтезу. Він базується на тому, що, на щастя, майже усі 2040 елементів на антенному полі площею 140 га залишилися практично цілими. На жаль, найскладніші вихідні фазообертачі й апаратні будівлі зруйновано та розграбовано. Власне антенне поле є дуже цінним: його вартість становить не менше половини вартості всього радіотелескопа. З урахуванням конфігурації УТР-2 і попередньої багаторусної структури аналогового фазування пропонується розділити все антенне поле на 68 30-елементних суббрешіток (48 у плечах Південь–Північ (Пд–Пн) і 20 у плечі Схід–Захід (Сх–Зх)). При цьому 6 елементів у ряду об'єднувалися фазообертачами ФО 6-4, а 5 рядів — фазообертачами ФО 5-5. Однак, для розширення смуги робочих частот, а також підвищення рівномірності та плавності зміни параметрів суббрешіток у процесі дискретного переміщення променя пропонується збільшити розрядність фазообертачів, тобто кількість положень променя на небесній півсфері. Раніше фазообертачі антени Пд–Пн ФО 6-4 мали $2^4 = 16$ положень променя за координатою Сх–Зх, а ФО 5-5 — $2^5 = 32$ положення за координатою Пд–Пн. Пропонується впровадити нові фазообертачі типу ФО 6-6 (6 входів, $2^6 = 64$ положення) і ФО 5-6 (5 входів, $2^6 = 64$ положення). Загалом планується 4 типи нових фазообертачів (ФО_{ПН} 6-6, ФО_{ПН} 5-6, ФО_{СЗ} 6-6, ФО_{СЗ} 5-6), лінії затримки яких узгоджено з геометричними розмірами субсекцій в антенах Пд–Пн та Сх–Зх. Раніше нерівномірність характеристик при переключенні напрямку фазування становила $\sim 0,5$ дБ, а при застосуванні нових типів фазооберта-

чів становитиме $\sim 0,15$ дБ. Підкреслимо, що всі 68 суббрешіток максимально зближені, забезпечуючи щільне заповнення UV-площини. Суббрешітки LOFAR і NenuFAR рознесені на відстань, що істотно перевищує довжину хвилі навіть на низьких частотах, і формують незаповнену апертуру з відносно високим рівнем бічних пелюсток.

- Нова система антенного підсилення на виходах ФО 5-6 матиме двокаскадну структуру з двотактними комірками за схемою Дарлінгтона з підвищеними чутливістю та динамічним діапазоном при загальному підсиленні ~ 30 дБ. Структура також містить оптимальну послідовність НЧ і ВЧ фільтрів з еквалайзерами для зменшення градієнта амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) із загальною смугою не менше 3...40 МГц і нерівномірністю АЧХ < 3 дБ (раніше було > 20 дБ). На вході підсилювача встановлюється герконовий комутатор для підключення узгодженого навантаження 75 Ом з температурою ~ 300 К (аналог калібрування за галактичним фоном). На виході підсилювачів субсекцій встановлюються АЦП з розрядністю 16 біт, з тактовою частотою ~ 100 МГц, з електронно-оптичними перетворювачами, з'єднаними з оптоволоконними лініями передачі довжиною від десятків метрів до 1 км. Загальна довжина становитиме $\sim (1 \text{ км} \times 68) / 2 \approx 34 \text{ км}$. Цифрові дані по лініях передачі подаватимуться в нову центральну лабораторну будівлю.

- Ще однією принциповою відмінністю нової структури від попередньої є переведення систем керування фазообертачами та передачі інших команд також у цифровий формат із використанням оптоволоконних ліній зв'язку. У штатному режимі всі фазообертачі керуються однаково, що спрощує передачу команд керування, однак для гнучкості застосування всього радіотелескопа доцільним є незалежне керування окремими частинами антени.

- У процесі підготовки та реалізації даної модернізації УТР-2 дуже важливі нові детальні теоретичні розрахунки всіх параметрів 30-елементних суббрешіток (коефіцієнт корисної дії, ефективна площа, діаграма спрямованості, чутливість) залежно від частоти, орієнтації променя, параметрів ґрунту, взаємного впливу елементів і крайових ефектів. Інтерес становить оцінка можливості розширення діапазону частот як ан-

тенних елементів, так і субрешіток. Розрахунки для всього телескопа в новій конфігурації дозволять оцінити потенційні можливості УТР-2 у розв'язанні актуальних астрофізичних задач, впровадженні нових спостережних методологій, із детальним зіставленням розрахунків і експериментів та застосуванням безкалібрувальних абсолютних і відносних вимірювань.

• Фінальна стадія реалізації запропонованого плану полягає у підключенні всіх оптоволоконних ліній передачі до спеціального потужного швидкодіючого сигнального процесора в центральній лабораторній будівлі. У цьому разі має місце повна аналогія з цифровим апертурним синтезом для нещодавно створених інструментів нового покоління LOFAR і NenuFAR. Є попередня домовленість із колегами з Нідерландів і Франції про сприяння у виготовленні та/або придбанні такого сигнального процесора (суперкомп'ютера) для переведення УТР-2 у ефективний і перспективний для світової низькочастотної радіоастрономічної спільноти режим багатопроменевого високочутливого цифрового апертурного синтезу.

4.3. Додаткові переваги УТР-2 у результаті відновлення та подальшої модернізації

Стисло розглянемо нові технічні й астрофізичні можливості майбутнього застосування УТР-2. Звісно, внаслідок настільки глобального запланованого переоснащення одного з найстаріших і найбільших у світі радіотелескопів (фактично, після модернізації це буде новий інструмент) важко передбачити всі його перспективні можливості. Зазначимо лише деякі з них.

• У старій конфігурації одночасно було $N = 5 \times 1 = 5$ променів. Їхня кількість обмежувалася шириною діаграми секції: $L_c \approx 225$ м; $\Theta_c \approx 4^\circ$. 30-елементна субрешітка має діаграму $\Theta_{cp} \approx 12^\circ \times 12^\circ$, це величина поля зору телескопа, в якому діаграма всього телескопа $\Theta_T = 0,5^\circ \times 0,5^\circ$ вкладається в поле $N = (12/0,5) \times (12/0,5) = 576$ променів. Це в ~ 100 разів більше променів, ніж у старій конфігурації, що в стільки ж разів збільшує швидкість оглядів неба та дає практично миттєве картографування об'єктів у полі зору $\Theta_0 \approx 12^\circ \times 12^\circ$.

• Перенесення антенних підсилювачів ближче до входу сигналу в антенну решітку забезпечує перевищення антенних температур фону над власними шумами на 20 дБ у діапазоні 3...40 МГц (раніше це значення становило 3...10 дБ у діапазоні 8...33 МГц). У результаті збільшення чутливості за яскравісною температурою та густиною потоку становитиме 2...4 рази.

• Розширення абсолютного і відносного робочого діапазону частот $f_{\max} - f_{\min} = 40 - 3 = 37$ МГц; $f_{\max} / f_{\min} = 40 / 3 \approx 13$ (раніше було $f_{\max} - f_{\min} = 25 - 10 = 15$ МГц; $f_{\max} / f_{\min} = 25 / 10 \approx 2,5$) значно підвищує як потенційну чутливість вимірювань, так і кількість нових астрофізичних задач, таких, як пошук червонозміщеної лінії гідрогену Темних віків [13], нових пошукових оглядів пульсарів [14], пошуку блискавок від планет Сонячної системи [15] та інших, які буде можливо вирішити.

• Розширення смуги реєстрації сигналів (раніше було 10...200 кГц, зараз 1...10 МГц, буде 5...37 МГц) істотно підвищуватиме радіометричний виграш, а отже чутливість радикально знижуватиме рівень бічних пелюсток (особливо в Т-подібній конфігурації, що дає діаграму вигляду $\sin(x)/x$), дифракційних пелюсток на частотах ≥ 22 МГц і знижує вплив ефекту сплутування (*confusion effect*).

• Беручи до уваги, що розширення в просторі бічних пелюсток Т-подібного радіотелескопа таке саме, як і в прямокутній решітці, що має положення бічних пелюсток лише на двох ортогональних напрямках, у ширококутовому режимі приймання відчутні бічні пелюстки зосереджуються в укрив вузькому тілесному куті ~ 2 кв. градуси, що принципово поліпшує завадостійкість вимірювань як щодо земних радіозавад, так і щодо розподілених по небу завадових радіоджерел будь-якої інтенсивності. Це особливо продуктивно при врахуванні моделей розподілу принаймні найпотужніших джерел, а також яскравісних температур галактичного фону.

• Підвищення рівномірності коефіцієнта передачі залежно від частоти й часу при стеженні за джерелами поліпшує динамічний діапазон системи, її чутливість, завадостійкість, якість реєстрації та обробки спостережних даних. Ідентичність усіх 68 субрешіток, однорідність їхнього розподілу по апертурі з рівними вагами, щільність розміщення, можливість використан-

ня в будь-яких комбінаціях дозволяють отримувати будь-які варіанти заповнення UV-площини, включно зі 100% заповненням із відновленням «нульових» просторових частот.

- Відхід від численних регулювань у старій приймальній системі УТР-2 та складних калібрувань багатьох (але не всіх) ярусів тракту, а натомість застосування пристроїв сучасної високостабільної цифрової передачі практично всіх прийнятих сигналів і службових сигналів керування, які не схильні до кліматичних і часових дрейфів та впливу радіозавад, знаючи параметри галактичного фону й точні параметри антен, дає змогу реалізувати інноваційні методи контролю всього інструмента й «безкалібрувальні» абсолютні та відносні вимірювання енергетичних параметрів усіх типів космічних низькочастотних радіосигналів.

- Зазначимо, що максимальне розширення смуги реєстрації не лише для джерел континууму, а й для інших видів вузькосмугових та імпульсних випромінювань не суперечить логіці. Наприклад, для вузьких за частотою рекомбінаційних радіоліній можливе їхнє накладання в максимальній смузі, аж до всього діапазону 3...70 МГц, де є багато сотень ліній із відстанями між ними порядку 100 кГц. У задачі надчутливого пошуку ліній вуглецю та водню такий метод розв'язання цілком виправданий. Імпульсне та спорадичне радіовипромінювання (пульсари, Сонце, Юпітер, Сатурн тощо) також широкосмугове, але з істотним дрейфом за частотою на динамічних спектрах у координатах час—частота. Для досягнення рекордної чутливості в пошуку дуже слабких ефектів можливе усереднення з компенсацією дисперсійної затримки в смузі частот.

- Поліпшення основних параметрів УТР-2 у ході попередньої та подальших модернізацій стимулювало перегляд оцінок чутливості й інших параметрів експериментів з метою уточнення кола розв'язуваних наукових задач. З'ясувалося, що зроблені близько 50 років тому оцінки рівня сплутування (*confusion effect*), засновані на даних каталогу 3С, були вельми неточними та становлять не 28 Ян, а досягають величини 5 Ян поблизу частоти 20 МГц. Це дає потенційну можливість виявлення на УТР-2 10^4 радіоджерел на видимій небесній півсфері, а не 3400, як було зареєстровано у вузькосмуговому режи-

мі (зі смугою ~ 10 кГц) у попередні роки. Звісно, безпрецедентна кутова роздільна здатність РН-ДБ-режиму на LOFAR ($f = 16...30$ МГц; $\Theta_T \approx 45''$; $\Delta S_{\min} \approx 12$ мЯн) дозволила виявити близько $2 \cdot 10^5$ радіоджерел [16]. Проте співставлення вимірювань із даними, отриманими на радіотелескопі із заповненою апертурою УТР-2 (режим *single-dish*), становить істотний інтерес.

Підсумовуючи перелічені очікувані позитивні результати з попередніми, можна зробити висновок про потенційно високу ефективність УТР-2, який відчутно якісно доповнить унікальну європейську низькочастотну мережу радіотелескопів⁷.

Висновки

Протягом більш ніж столітньої історії Національної академії наук України низькочастотна радіоастрономія була й залишається одним із пріоритетних напрямів фундаментальної та прикладної науки. Ця діяльність, ініційована в середині 50-х років минулого століття видатним вченим, академіком Семеном Яковичем Брауде за максимальної підтримки також унікальної особистості президента НАН України Бориса Євгеновича Патона, довела найвищий світовий рівень вітчизняних фізико-математичних і технічних наук. Це справедливо і в бурхливих, драматичних подіях минулого століття, і навіть на початку XXI століття.

Серед багатьох наукових і науково-організаційних досягнень С.Я. Брауде в галузі радіофізики, геофізики, військово-прикладної діяльності створена ним школа низькочастотної радіоастрономії, включно з унікальною експериментальною базою та всесвітньо відомими результатами, займає особливе місце. Наукова школа Брауде вже давно відома та визнана у світі, займаючи провідне положення в радіоастрономічній науці. Протягом 70 років кілька поколінь колег, соратників і послідовників не лише зберегли високий науково-технічний потенціал низькочастотної радіоастрономії, а й безперервно забезпечували її прогрес, модернізацію існуючих телескопів УТР-2, УРАН-1...УРАН-4 і створення нових інструментів (ГУРТ, мобільні антени, спеціальні

⁷ Albergaria, D., Frantseva, K., Russo, P., et al., 2025. Ukrainian wartime astronomy and its prospects. *Nat. Astron.*, 9, pp. 1408-1411. DOI: 10.1038/s41550-025-02657-w

елементи для наземних і космічних місій). Здобуття Україною незалежності в 1991 році відкрило нову сторінку в подальшому розвитку вітчизняної радіоастрономії, тісного міжнародного співробітництва з провідними радіоастрономічними інститутами та інтеграції у світову радіоастрономічну спільноту.

Отримані результати, особливо в останні десятиліття, зокрема в ході міжнародних експериментів, добре відомі й визнані у світі. Радіотелескопи УТР-2, УРАН, ГУРТ максимально затребувані й незамінні для приголомшливого прогресу світової низькочастотної радіоастрономії, включно зі створенням і застосуванням телескопів нового покоління LOFAR, NenuFAR, LWA, MWA, SKA-low. З іншого боку, це підтверджує, що Семен Якович не помилився, засновуючи нову радіоастрономічну школу в 1950-х роках, оскільки він одним із перших усвідомив найвищу астрофізичну значущість низькочастотної радіоастрономії й організував створення відповідних високоефективних радіотелескопів нового, на ті далекі роки, покоління.

Неспровокована агресія сусідньої країни завдала шкоди та навіть зруйнувала багато в нашій країні. Не уникнула цієї долі й наукова діяльність, включно з радіоастрономією та її унікальною експериментальною базою — повністю зруйновано й розграбовано головну частину найбільшого у світі радіотелескопа УТР-2 та інфраструктуру обсерваторії, що носить ім'я С.Я. Брауде. Однак знищити науку й незалежність України не вдалося і не вдасться. Наукова спільнота й народ України не втрачають оптимізму та впевне-

ні в перемозі справедливості, здорового глузду та відновленні всіх аспектів життя нашої європейської країни. Немає сумнівів у подальшому прогресі української та світової радіоастрономії, активній інтеграції у світову наукову спільноту та відновленні радіотелескопа УТР-2 — найкращого пам'ятника видатному радіоастроному — Семену Яковичу Брауде.

Автори статті висловлюють щиру подяку багатьом поколінням співробітників ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України, РІ НАН України та інших організацій, які брали участь у створенні, застосуванні, обслуговуванні українських радіотелескопів, обробці даних, астрофізичній інтерпретації результатів. Не можна не відзначити з вдячністю виняткову роль Національної академії наук України та її керівництва у віковій історії розвитку всіх напрямів української науки, і, звісно, астрономії та радіоастрономії.

Величезна вдячність багатьом закордонним колегам за плідне співробітництво, взаєморозуміння, всебічну наукову та матеріальну підтримку. Особлива подяка Збройним силам України, які захищають нашу країну, її громадян, даючи можливість працювати в цих драматичних умовах.

Описані дослідження виконано в рамках держбюджетних робіт: НАН України, МОН України, міжнародних грантів. У 2022–2026 роках виконувалися НДР: «Огляд», «Мережа», «Радіус», конкурсні проекти «Сигнал», «Медіум», (НАН України), «Супернова» (Фонд фундаментальних досліджень МОН України), «Особливості та взаємодія явищ у сонячній короні та міжпланетному» (Міжнародний проєкт УНТЦ-6435).

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Смирнов В. Семен Якович Брауде. Першовідкривач таємниць всесвіту. Полтава історична. 2011. URL: http://poltavahistory.inf.ua/mans2_7u.html (дата звернення: 01.06.2026)
2. До 100-річчя академіка Брауде С.Я. 2011. URL: https://www.youtube.com/watch?v=Zom_0y1k1GE (дата звернення: 01.06.2026)
3. Braude S.Ya., Lebedeva O.M., Megn A.V., Ryabov B.P., Zhouck I.N. The spectra of discrete radio sources at decametric wavelengths. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 1969. Vol. 143, Iss. 3. P. 289–300.
4. Braude S.Ya., Megn A.V., Ryabov B.P., Sharykin N.K., Zhouck I.N. Decametric survey of discrete sources in the Northern sky. I. The UTR-2 radio telescope. Experimental techniques and data processing. *Astron. Space Sci.* 1978. Vol. 54. P. 3–36.
5. Braude S.Ya., Megn A.V. Radio Astronomy Researches in Ukraine in Decameter Wave Range. *Radio Phys. Radio Astron.* 1996. Vol. 1 Iss. 1. P. 9–24.
6. Bubnov I.M., Stanislavsky A.A., Shevchuk N.V., Stanislavsky L.A., Konovalenko A.A., Ulyanov O.M., Zakharenko V.V., Reznichenko A.M., Dorovsky V.V., Yerin S.M., Selin V.Yu., Belov A.S., Shevchenko V.V., Vashchishyn R.V., Myrhorod V.I. A solar-powered mobile phased array for radio astronomy observations at low frequencies. *J. Astron. Instrum.* 2025. Vol. 14, Iss. 3–4. 2550009. DOI: 10.1142/S2251171725500096

7. Tokarsky P.L., Konovalenko A. A., Modelski J. An active ribbon dipole as an array element prototype for the lunar very low frequency radio telescope. *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 75225–75235.
8. Bubnov I.M., Stanislavsky O.O., Yerin S.M., Tokarsky P.L., Konovalenko O.O., Stanislavsky L.O., Belov O.S. Terrestrial investigation of the low-frequency sensitivity of a radio astronomical antenna proposed for lunar far-side observations of cosmic radio emissions. *Radio Phys. Radio Astron.* 2026. Vol. 31, Iss. 1. P. 35–50. DOI: 10.15407/rpra31.01.035
9. Braude S.Y., Men A.V., Sodin L.G. Decameter wave radio telescope UTR-2. *Antennas*: Coll. Art. A.A. Pistol Kors (ed.). Moscow: Svyaz' Publ., 1978. Iss. 26. P. 3–15.
10. Men A.V., Sodin L.G., Sharykin N.K., Braude Y.M., Melianovsky P.A., Inyutin G.A., Goncharov N.Y. Design principles and characteristics of the UTR-2 radio telescope antennas. *Antennas*: Coll. Art. A.A. Pistol Kors (ed.). Moscow: Svyaz' Publ., 1978. Iss. 26. P. 15–57.
11. van Haarlem M.P., Wise M.W., Gunst A.W., et al. LOFAR: The LOw-Frequency ARray. *Astron. Astrophys.* 2013. Vol. 556, A2. DOI: 10.1051/0004-6361/201220873
12. Briand C., Cecconi B., Chrysaphi N., Girard J.N., Griesmeier J.-M., Hariharan K., Loh A., Murphy P., Sasikumar Raja, K., Zarka P., Zhang P. NenuFAR performance for solar radio observations. *URSI Radio Sci. Lett.* 2022. Vol. 4, 17. DOI: 10.46620/22-0017
13. Liu A., Pritchard J.R., Tegmark M., Loeb A. Global 21 cm signal experiments: A designer's guide. *Phys. Rev. D*. 2013. Vol. 87, Iss. 4. 043002. DOI: 10.1103/PhysRevD.87.043002
14. Sanidas S., Cooper S., Bassa C.G., Hessels J.W.T., Kondratiev V.I., Michilli D.B.W., Tan C.M., van Leeuwen J., Cerrigone L., Fallows R.A., Iacubelli M., Orrú E., Pizzo R.F., Shulevski A., Toribio M.C., ter Veen S., Zucca P., Bondonneau L., Griesmeier J.-M., Karastergiou A., Kramer M., Sobey C. The LOFAR Tied-Array All-Sky Survey (LOTAAS): Survey overview and initial pulsar discoveries. *Astron. Astrophys.* 2019. Vol. 626. A104. DOI: 10.1051/0004-6361/201935609
15. Gurnett D.A., Kurth W.S., Cairns I.H., Granroth L.J. Whistlers in Neptune's magnetosphere: Evidence of atmospheric lightning. *J. Geophys. Res.* 1990. Vol. 95, Iss. A12. P. 20967–20976. DOI: 10.1029/JA095iA12p20967
16. Groeneveld C., van Weeren R.J., Osinga E., Williams W.L., Callingham J.R., de Gasperin F., Botteon A., Shimwell T., Sweijsen F., de Jong J.M.G.H.J., Jansen L.F., Miley G.K., Brunetti G., Brüggén M., Röttgering H.J.A. Characterization of the decametre sky at subarcminute resolution. *Nat. Astron.* 2024. Vol. 8. P. 786–795. DOI: 10.1038/s41550-024-02266-z

Стаття надійшла 15.04.2026

REFERENCES

1. Smyrnov, V., 2011. Semen Yakovych Braude. Discoverer of the secrets of the Universe. *Historical of Poltava*. Available from: http://poltavahistory.inf.ua/mans2_7u.html (Accessed: 01.06.2026)
2. *To the 100th anniversary of Academician S.Ya. Braude*. 2011. Available from: https://www.youtube.com/watch?v=-Zom_0y1k1GE (Accessed: 01.06.2026)
3. Braude, S.Ya., Lebedeva, O.M., Megn, A.V., Ryabov, B.P., Zhouck, I.N., 1969. The spectra of discrete radio sources at decametric wavelengths. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **143**(3), pp. 289–300.
4. Braude, S.Ya., Megn, A.V., Ryabov, B.P., Sharykin, N.K., Zhouck, I.N., 1978. Decametric survey of discrete sources in the Northern sky. I. The UTR-2 radio telescope. Experimental techniques and data processing. *Astron. Space Sci.*, **54**, pp. 3–36.
5. Braude, S.Ya., Megn, A.V., 1996. Radio Astronomy Researches in Ukraine in Decameter Wave Range. *Radio Phys. Radio Astron.*, **1**(1), pp. 9–24.
6. Bubnov, I.M., Stanislavsky, A.A., Shevchuk, N.V., Stanislavsky, L.A., Konovalenko, A.A., Ulyanov, O.M., Zakharenko, V.V., Reznichenko, A.M., Dorovskyy, V.V., Yerin, S.M., Selin, V.Yu., Belov, A.S., Shevchenko, V.V., Vashchishyn, R.V., Myrhorod, V.I., 2025. A solar-powered mobile phased array for radio astronomy observations at low frequencies. *J. Astron. Instrum.*, **14**(3–4), 2550009. DOI: 10.1142/S2251171725500096
7. Tokarsky, P.L., Konovalenko, A.A., Modelski, J., 2023. An active ribbon dipole as an array element prototype for the lunar very low frequency radio telescope. *IEEE Access*, **11**, pp. 75225–75235.
8. Bubnov, I.M., Stanislavsky, O.O., Yerin, S.M., Tokarsky, P.L., Konovalenko, O.O., Stanislavsky, L.O., Belov, O.S., 2026. Terrestrial investigation of the low-frequency sensitivity of a radio astronomical antenna proposed for lunar far-side observations of cosmic radio emissions. *Radio Phys. Radio Astron.*, **31**(1), pp. 35–50. DOI: 10.15407/rpra31.01.035
9. Braude, S.Y., Men, A.V., Sodin, L.G., 1978. Decameter wave radio telescope UTR-2. In: A.A. Pistol Kors, ed. 1978. *Antennas*. Moscow: Svyaz' Publ. 26, pp. 3–15.
10. Men, A.V., Sodin, L.G., Sharykin, N.K., Braude, Y.M., Melianovsky, P.A., Inyutin, G.A., Goncharov, N.Y., 1978. Design principles and characteristics of the UTR-2 radio telescope antennas. In: A.A. Pistol Kors, ed. 1978. *Antennas*. Moscow: Svyaz' Publ. 26, pp. 15–57.
11. van Haarlem, M.P., Wise, M.W., Gunst, A.W., et al., 2013. LOFAR: The LOw-Frequency ARray. *Astron. Astrophys.*, **556**, A2. DOI: 10.1051/0004-6361/201220873
12. Briand, C., Cecconi, B., Chrysaphi, N., Girard, J.N., Griesmeier, J.-M., Hariharan, K., Loh, A., Murphy, P., Sasikumar Raja, K., Zarka, P., Zhang, P., 2022. NenuFAR performance for solar radio observations. *URSI Radio Sci. Lett.*, **4**, 17. DOI: 10.46620/22-0017

13. Liu A., Pritchard J.R., Tegmark M., Loeb A., 2013. Global 21 cm signal experiments: A designer's guide. *Phys. Rev. D*, **87**(4), 043002. DOI: 10.1103/PhysRevD.87.043002
14. Sanidas, S., Cooper, S., Bassa, C.G., Hessels, J.W.T., Kondratiev, V.I., Michilli, D.B.W., Tan, C.M., van Leeuwen, J., Cerri-gone, L., Fallows, R.A., Iacobelli, M., Orrú, E., Pizzo, R.F., Shulevski, A., Toribio, M.C., ter Veen, S., Zucca, P., Bondon-neau, L., Griebmeier, J.-M., Karastergiou, A., Kramer, M., Sobey, C., 2019. The LOFAR Tied-Array All-Sky Survey (LOTA-AS): Survey overview and initial pulsar discoveries. *Astron. Astrophys.*, **626**, A104. DOI: 10.1051/0004-6361/201935609
15. Gurnett, D.A., Kurth, W.S., Cairns, I.H., Granroth, L.J., 1990. Whistlers in Neptune's magnetosphere: Evidence of atmo-spheric lightning. *J. Geophys. Res.*, **95**(A12), pp. 20967–20976. DOI: 10.1029/JA095iA12p20967
16. Groeneveld, C., van Weeren, R.J., Osinga, E., Williams, W.L., Callingham, J.R., de Gasperin, F., Botteon, A., Shimwell, T., Sweijen, F., de Jong, J.M.G.H.J., Jansen, L.F., Miley, G.K., Brunetti, G., Brüggén, M., Röttgering, H.J.A., 2024. Characteriza-tion of the decametre sky at subarcminute resolution. *Nat. Astron.*, **8**, pp. 786–795. DOI: 10.1038/s41550-024-02266-z

Received 15.04.2026

O.O. Konovalenko¹, V.V. Zakharenko¹, O.M. Ulyanov¹, L.I. Gurvits²,
 I.B. Vavilova³, Ya.S. Yatskiv³, P.L. Tokarsky¹, O.O. Stanislavsky¹, I.M. Bubnov¹,
 M.M. Kalinichenko¹, S.V. Stepkin¹, M.A. Sydorchuk¹, E.V. Vasylykivskyi¹,
 O.M. Reznichenko¹, M.V. Shevchuk¹, L.O. Stanislavsky¹, S.M. Yerin¹,
 V.O. Shepelev¹, V.V. Dorovskii¹

¹ Institute of Radio Astronomy of the NAS of Ukraine
 4, Mystetstv St., Kharkiv, 61002, Ukraine

² Faculty of Aerospace Engineering, Delft University of Technology,
 Kluyverweg 1, 2629 HS Delft, The Netherlands

³ Maine Astronomical Observatory of the NAS of Ukraine
 27, Acad. Zabolotnogo St., Kyiv, 03143, Ukraine

70 years OF LOW-FREQUENCY RADIO ASTRONOMY IN UKRAINE

Subject and Purpose. The article is devoted to the birth and seventy years of successful development of low-frequency radio astronomy in Ukraine. This activity was started in the mid-50s of the prior century by the outstanding Ukrainian scientist Academician Semen Yakovych Braude with the maximum support of the also unique personality of the President of the NAS of Ukraine Boris Yevgenovych Paton. The creation of the world's largest low-frequency radio telescopes and interferometers UTR-2 and URAN, the birth of a galaxy of outstanding scientists and a widely known radio astronomy school proved the highest world level of domestic physical, mathematical and technical sciences. The purpose of the work is a historical and scientific review of low-frequency radio astronomy in Ukraine and the income of S.Ya. Braude in its foundation.

Methods and Methodology. All stages of the creation of domestic experimental base of radio astronomy on decameter-me-ter waves are analyzed in comparison with world experience. The astrophysical advantages of low-frequency radio astronomy, methodological difficulties of observations in this range and means of overcoming them are revealed. This is done on the example of the creation and use for 70 years of radio telescopes UTR-2, URAN, GURT.

Results. The world's largest low-frequency radio telescopes have been created, which are the national scientific heritage of the country. Constant innovative modernization of observation tools and methods has allowed us to obtain a large number of priority results recognized by the international community, and has made the contribution of Ukrainian scientists an import-ant component of complex highly sensitive radio astronomy research.

Conclusions. For 70 years, low-frequency radio astronomy has been a priority area of research at the National Academy of Sciences of Ukraine. The scientific school created by the outstanding scientist, Academician S.Ya. Braude, is a significant con-tribution to domestic astrophysical science. Despite the hostile aggression in recent years, research continues and yields new results. There is no doubt about the post-war restoration of UTR-2 — the best monument to the outstanding radio astronomer S.Ya. Braude, and the further integration of Ukraine into the world scientific space.

Keywords: radio astronomy, decameter range, radio telescope, phased array antenna, phasing system, digital and analog receiving equipment.