

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra31.01.035>
УДК 520.272.2+621.396.674

**І.М. Бубнов, О.О. Станиславський, С.М. Єрін, П.Л. Токарський,
О.О. Коноваленко, Л.О. Станиславський, О.С. Белов**

Радіоастрономічний інститут НАН України
вул. Мистецтв, 4, м. Харків, 61002, Україна
E-mail: bubnov.igor.n@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ В ЗЕМНИХ УМОВАХ ЧУТЛИВОСТІ НИЗЬКОЧАСТОТНОЇ РАДІОАСТРОНОМІЧНОЇ АНТЕНИ ДЛЯ МОЖЛИВИХ ВИМІРЮВАНЬ РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ ВСЕСВІТУ НА ЗВОРОТНОМУ БОЦІ МІСЯЦЯ

Предмет і мета роботи. Теоретичні та експериментальні дослідження активного антенного елемента низькочастотного радіотелескопа, призначеного для майбутньої обсерваторії на зворотній стороні Місяця, з увагою на спрощенні його конструкції. Головним завданням цього дослідження є забезпечення високої флуктуаційної чутливості при максимально можливому зменшенні маси та габаритів антени, що буде корисним для її доставки та розгортання на місячній поверхні.

Методи та методологія. Для розробки антени, масштабованої з елемента антенної решітки радіотелескопа ГУРТ, для роботи в діапазоні 4...40 МГц було запропоновано усунути триметрову вертикальну опору, використовуючи плечі схрещених диполів як носійні елементи. Ефективність такого рішення оцінювалася за чутливістю антени, зокрема за критерієм, що характеризує перевищення зовнішньої шумової температури антени над внутрішньою шумовою температурою. Експериментальні дослідження антени в земних умовах проводилися за допомогою спостережень короткохвильового радіошуму як фактично «безкоштовного генератора» для визначення характеристик антени в широкій смузі частот. Застосування такого пасивного методу моніторингу дозволяє перевірити роботу антени в умовах реального завадового середовища, що визначається станом іоносферних шарів D і F2.

Результати. Числовий аналіз і експериментальні вимірювання показали, що запропонована конструкція без опорної стійки майже не погіршує чутливості антени, дозволяючи ефективно приймати радіохвилі у діапазоні 7...40 МГц. Експериментальні результати показали можливість роботи антени нижче 7 МГц, ефективність якої в земних умовах переважно обмежено впливом місцевих радіозавод. У місячних умовах, де такі перешкоди відсутні, це відкриває додаткові перспективи для спостережень. Отримані дані підтверджують здатність антени реєструвати вплив геофізичних явищ на параметри іоносфери.

Висновки. Отримані результати підтверджують ефективність спрощеної конструкції активної антени та її корисність до застосування у місячних місіях. Крім цього, її можна застосовувати для моніторингу сонячного випромінювання та вивчення космічних радіоджерел у земних умовах досліджень. Встановлено, що завдяки повній відмові від опорної щогли нова модифікація стала компактнішою за прототип ГУРТ, що критично важливо для космічного транспортування.

Ключові слова: активна антена, іоносфера, Місяць, радіоастрономічні спостереження, чутливість, шар F2

Цитування: Бубнов І.М., Станиславський О.О., Єрін С.М., Токарський П.Л., Коноваленко О.О., Станиславський Л.О., Белов, О.С. Дослідження в земних умовах чутливості низькочастотної радіоастрономічної антени для можливих вимірювань радіовипромінювання Всесвіту на зворотному боці Місяця. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2026. Т. 31. № 1. С. 35—50. <https://doi.org/10.15407/rpra31.01.035>

© 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>)

Вступ

В Україні накопичено вагомий досвід у галузі декаметрової радіоастрономії та розробки низькочастотних антен, який може бути корисним для участі в міжнародних космічних проєктах, зокрема пов'язаних із дослідженням Місяця та радіовипромінювання дальнього космосу. Незважаючи на складність і високу вартість таких проєктів, вони викликають значний інтерес у світової наукової спільноти [1–4]. У відповідь на такий інтерес і натхненні успіхами останніх роботизованих місячних місій (Lunar Reconnaissance Orbiter, Chandrayaan-1, ChangE-1 та інші) українські вчені також запропонували власну програму [5, 6]. Вона передбачає довготривале вивчення Місяця та навколomisячного простору, а також встановлення на зворотному (невидимому із Землі) боці Місяця низькочастотного радіотелескопа для спостережень об'єктів Сонячної системи та інших джерел радіовипромінювання Всесвіту.

Розробка антенної системи є першим і найважливішим етапом проєктування будь-якого космічного радіотелескопа, оскільки саме вона визначає його габарити, масу та чутливість. На низьких частотах (до 100 МГц) оптимальним рішенням є фазована антенна решітка, чутливість якої безпосередньо залежить від чутливості її окремих елементів. Роботи зі створення низькочастотного антенного елемента для розміщення на зворотному боці Місяця розпочалися в РІ НАН України з 2018 року. У роботі [6] було показано концепцію та початкові дослідження активної антени — дослідного макета, що працює в діапазоні 4...40 МГц. Прототип елемента майбутньої решітки створено на основі антенного елемента радіотелескопа ГУРТ, масштабованого за геометричними розмірами у два рази, що дозволило змістити його робочі частоти в більш низький діапазон частот (робоча смуга частот ГУРТ у діапазоні 8...80 МГц).

Метою цієї роботи є подальша оптимізація конструкції низькочастотного антенного елемента та визначення його характеристик у земних умовах, а також демонстрація розширених функціональних можливостей. Зокрема, ключовим завданням стало усунення необхідності в зовнішній триметровій опорній стійці, яка використовувалась у попередньому прототипі ан-

теного елемента [6]. Це потенційно спрощує розгортання антени на місячній поверхні та знижує її вагу. Для цього було запропоновано використовувати плечі схрещених диполів як несучі елементи. Ефективність такої самоносійної конструкції оцінювалася за її чутливістю та критерієм Sky Noise Dominance (SND), який характеризує відношення зовнішньої шумової температури антени до внутрішньої власної шумової температури активної антени.

Окрім своєї першочергової мети для застосувань у місячних місіях, така антена також відкриває значні перспективи для її використання в земних умовах. Її характеристики дозволяють проводити дослідження іоносфери, оцінювати ефективність короткохвильового радіозв'язку та проводити дослідження проявів сонячної погоди, а також здійснювати моніторинг радіозавад, спричинених грозовою активністю та іншими чинниками. Завдяки своїм характеристикам антена може бути використана в різних умовах як для космічних місій, так і для наземних досліджень.

Низькочастотні радіоастрономічні дослідження зі зворотного боку Місяця мають деякі переваги: по-перше, відсутність впливу земної іоносфери дозволяє проводити спостереження на частотах нижче її іоносферної відсічки (8...12 МГц), а, по-друге, Місяць слугує природним екраном, що надійно захищає точку приймання від техногенних і природних радіозавад із боку Землі. Дослідження космічного радіовипромінювання на частотах, нижчих за 10 МГц, залишається в центрі уваги науковців [7, 8], оскільки дозволяє отримати важливі дані про корональні викиди мас на Сонці, радіосплески, випромінювання планет, пульсарів, а також властивості інших космічних радіоджерел. У цій роботі досліджується ефективність оптимізованого антенного елемента в смузі частот 4...40 МГц із метою забезпечення високої чутливості, необхідної для застосування в майбутній місячній обсерваторії.

1. Конструкція активної антени

1.1. Опис наземної конструкції

На рис. 1 наведено фотографію зовнішнього вигляду низькочастотної радіоастрономічної активної антени, призначеної для дослідження об'єктів Всесвіту в смузі частот 4...40 МГц.

Елемент антени являє собою два ортогональних схрещених ширококутових диполя складної форми з незалежними входами (рис. 1). Плечі диполів виготовлено зі сталеві труби 27×1.2 мм, довжиною 2.8 м вздовж середньої лінії та нахилено до землі під кутом 45° . Точку живлення диполя розташовано на висоті 1.8 м над поверхнею ґрунту. Антена має самоносійну конструкцію. У земних умовах таку антену відносять до класу приземних антен, тобто антен, встановлених безпосередньо на поверхню ґрунту без використання щогл чи стійок. Ця конфігурація забезпечує механічну простоту, зменшення ваги та зручність розгортання, що є особливо важливим для застосування в умовах космічних місій. Слід зазначити, що такий термін використовується, зокрема, в класичній монографії [9]. У точці живлення кожен диполь підключено до малошумного підсилювача (МШП). Використаний МШП базується на схемі підсилювача радіотелескопа ГУРТ [10], який модифіковано для зміщення робочої смуги в бік нижчих частот [6]. Слід зазначити, що в роботі [6] показано варіант підсилювача, адаптованого для екстремальних кліматичних умов Місяця. Зокрема, вибір компонентної бази та схемотехнічні рішення МШП розраховано на забезпечення стабільності характеристик в умовах значних температурних перепадів.

1.2. Вибір матеріалів для для конструкції антени

Конструкція елемента, призначена для розгортання на зворотному боці Місяця, передбачає використання неметалевих труб. Основним недоліком металевих матеріалів у місячних умовах є їхній високий коефіцієнт термічного розширення (КТР), що при може призводити до деформацій, напружень і поступового руйнування конструкції.

Альтернативою металевій конструкції є вуглепластики CFRP (Carbon Fiber-Reinforced Polymer). Застосування вуглепластиків як конструкційного матеріалу для космічних антен є технічно обґрунтованим завдяки їхньому низькому КТР, високій жорсткості, стійкості до радіаційної деградації та сприятливому співвідношенню міцності до ваги. Ці переваги підтверджено в серії досліджень, зокрема в [11], де розглядається вико-



Рис. 1. Фото макету нової активної антени

ристання композитів для місячного виробництва, а також у [12], де описано інноваційне застосування композитів із вуглецевого волокна в аерокосмічних системах NASA.

Ідею використання вуглепластику в космічних проєктах вже реалізовано, зокрема в проєкті Netherlands-China Low-Frequency Explorer (NCLF) [13, 14], де для антен довжиною 5 м, встановлених на апараті «Цюецяо» (Queqiao), було застосовано саме такі матеріали.

Однак електропровідність вуглепластиків є обмеженою: провідність забезпечується лише вуглецевим волокном, тоді як полімерна матриця є діелектриком. Для антенних елементів, яким потрібна висока електропровідність, на поверхню композитної структури наноситься металеве покриття (наприклад, алюмінієве або мідне), що зазвичай реалізується методом вакуумного напилення [15], де для місії Black Hole Explorer (BHEx) рекомендовано металізований CFRP як оптимальний матеріал для антен. Такий підхід потребує додаткових технологічних операцій і ретельного контролю якості. Крім того, вуглепластики можуть мати нижчу ударну в'язкість порівняно з металами, що вимагає продуманого конструктивного захисту від механічних навантажень.

Незважаючи на ці особливості, вуглепластикові композити залишаються перспективним матеріалом для місячних антен завдяки їхній термічній стабільності, високому співвідношенню міцності до ваги та можливості інтеграції з

провідними покриттями для забезпечення необхідних електричних характеристик. У діапазоні 4...40 МГц заміна металу на металізований CFRP практично не впливає на електродинамічні параметри антени через достатню провідність наплення для цих довжин хвиль. При цьому суттєво покращується термостабільність і надійність конструкції. Ідентичність характеристик дозволяє використовувати результати випробувань металевого прототипу для підтвердження працездатності антени з металізованого CFRP.

2. Числовий аналіз і експериментальні випробування активної антени

Багаторічні дослідження, проведені в межах українських радіоастрономічних програм [10, 16, 17], підтвердили високу ефективність низькочастотних активних антен для спостережень. Експлуатація таких антен у складі радіотелескопа ГУРТ засвідчила їхню високу чутливість у широкій смузі частот, завадостійкість і надійність. Ці характеристики досягаються завдяки застосуванню МШП. Розробка цих підсилювачів виконується за критеріями, спеціально адаптованими для радіоастрономічних потреб. При цьому враховуються характеристики фонового випромінювання Галактики, яке є одним з основних джерел шуму системи.

2.1. Чутливість і критерій *SND*

Ключовим критерієм ефективності радіотелескопа є його чутливість, яка зазвичай вимірюється найменшою густиною потоку потужності електромагнітної хвилі. Її можна виявити на тлі існуючих шумів. Для антени з однією поляризацією цей параметр можна визначити за формулою [6, 10]:

$$\Delta S_{\min} = \frac{2k_B T_B}{A_e \sqrt{\Delta f \tau n}} \left(1 + \frac{1}{SND} \right),$$

де k_B — стала Больцмана; T_B — яскравісна температура радіонеба; A_e — ефективна площа антени; Δf — ширина смуги пропускання приймача; τ — час інтегрування після детектора; n — число записів, що усереднюються; *SND* (згідно [18]) — це перевищення зовнішньої температури шуму над внутрішньою, що є важливим параметром для

оцінки якості приймання для активних антен, який розраховується за виразом:

$$SND = \frac{T_{ext}}{T_{int}},$$

де T_{ext} і T_{int} — відповідно зовнішня та внутрішня шумові температури активної антени, віднесені до входу МШП. Значення *SND* може бути отримане як теоретично, так і експериментально через вимірювання у спеціальних режимах (коротке замикання — КЗ, холостий хід — ХХ), як це продемонстровано в [6], що дозволяє порівнювати модель антени з її макетом з достатньою точністю.

2.2. Експериментальні та чисельні дослідження *SND*

Для дослідження характеристик розробленої активної приймальної антени було створено її відповідну комп'ютерну модель [6], що дозволяє отримувати електричні та шумові параметри, а також характеристики спрямованості. Для розрахунків параметрів диполя використовувалась відома програма NEC-2 (Numerical Electromagnetic Code), призначена для числових розрахунків дротяних антен, розташованих над реальним ґрунтом. За її допомогою було обчислено імпеданс, коефіцієнт корисної дії та ефективна площа досліджуваного диполя в широкому діапазоні частот від 1 до 70 МГц.

Польові випробування активної антени виконувалися в 2020 році в Радіоастрономічній обсерваторії ім. С.Я. Брауде. На рис. 2 показано графіки частотних залежностей перевищення зовнішньої температури шуму над власною температурою шуму активної антени для різних висот її розташування над поверхнею ґрунту.

Експериментальне визначення частотної залежності перевищення зовнішньої шумової температури антени завдяки впливу випромінювання Всесвіту над внутрішніми шумами МШП (*SND*) проводили виключно в нічний час. Це було зумовлено високим рівнем радіозавад протягом дня. Однак навіть вночі не вдалося отримати достовірну величину *SND* нижче 13 МГц через значний вплив радіозавад. На рис. 3 наведено відносну зовнішню температуру антени (крива 1), відносний шум МШП у режимі ХХ — крива 2 та відносний шум МШП у режимі КЗ — крива 3.

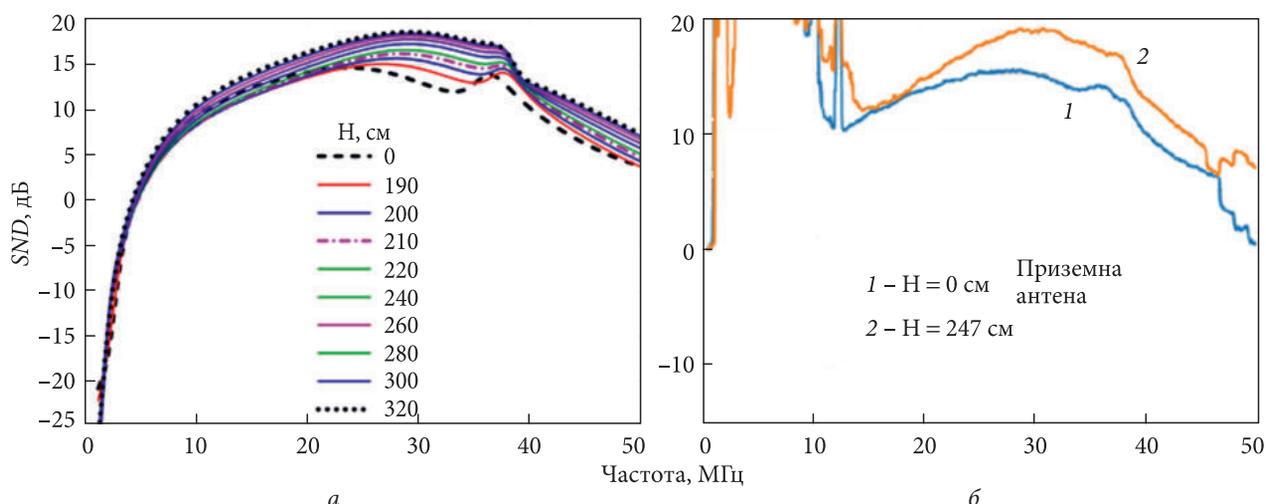


Рис. 2. Частотні залежності SND активної антени для різних висот її розташування над поверхнею ґрунту: результат розрахунків (а); експеримент (б)

Моделювання МШП показало, що власні шуми МШП у режимі КЗ близькі до власних шумів МШП при його навантаженні на імпеданс диполя [6]. Домінуючим внеском у зовнішню температуру є фонове випромінювання Галактики та Метagalактики на частотах вище 20...30 МГц, на частотах нижче 10...20 МГц переважають атмосферні завади (короткохвильовий радіошум), зумовлені природними джерелами радіошуму, такими як блискавки та іоносферні збурення [19]. Але таке моделювання не враховувало атмосферні завади. Віднімаючи від відносної зовнішньої антенної температури відносні власні шуми МШП у режимі КЗ, отримуємо експериментальну оцінку величини SND . Видно, що в смузі від 13 до 40 МГц вона становить понад 10 дБ, що узгоджується з результатами розрахунку. Невелике завищення експериментального SND пов'язано з тим, що власні шуми МШП у режимі КЗ трохи нижче власних шумів МШП при його навантаженні на імпеданс диполя та мають іншу частотну залежність. В оцінці SND нижче 13 МГц для наземних умов використовувалися тільки результати моделювання, оскільки через високий рівень радіозавад у цьому діапазоні не вдається отримати досить точні експериментальні дані.

2.3. Критерії оцінки робочої смуги та обґрунтування конструкції антени

Перевищення SND є ключовим параметром, за яким визначається робоча смуга активних антен

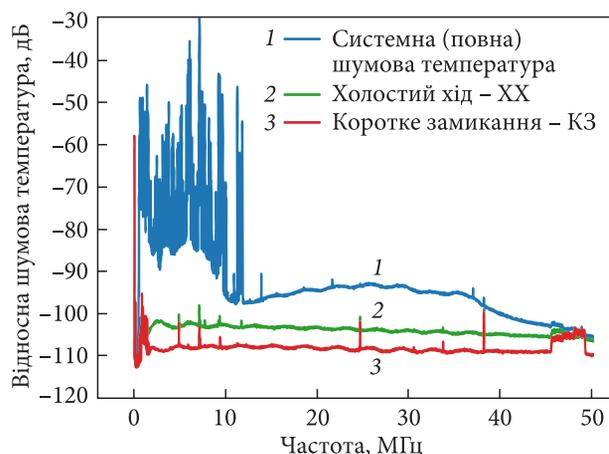


Рис. 3. Експериментальні спектри відносних шумових температур активної антени в різних режимах роботи: крива 1 – у штатному режимі; крива 2 – з розімкненим входом МШП; крива 3 – з короткозамкненим входом МШП (сплески на графіку спричинено радіозавадовими сигналами техногенного (штучного) походження)

для низькочастотних радіотелескопів. Існує кілька критеріїв оцінки робочої смуги інструменту за цим параметром.

Перший критерій. Коли можна повністю знехтувати шумами, які вносяться активним антенним елементом, що відповідає $SND \geq 10$ дБ [16, 17].

Другий критерій. Застосовують, коли час усереднення є меншим за характерний час зміни параметрів сигналу, тобто не призводить до втрати його часової або спектральної структури. У цьому випадку смуга визначається за рівнем $SND \geq 6$ дБ [18, 20].

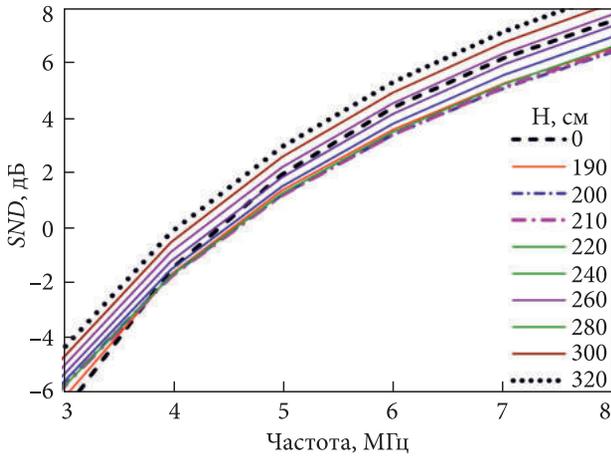


Рис. 4. Детальні частотні залежності SND активної антени в смузі частот 3.5...8 МГц для різних висот її розташування над поверхнею ґрунту

Третій критерій. Пов'язаний з погіршенням флуктуаційної чутливості в два рази ($SND = 0$ дБ, див. формулу).

Експериментальні та модельні результати показують, що за першим критерієм ($SND \geq 10$ дБ) нова антена працює в смузі 10...40 МГц. Незважаючи на поступове зниження SND у цьому діапазоні, його рівень залишається в межах, що задовольняють необхідним вимогам. Нижче 10 МГц через високий рівень радіозавад у земних умовах не вдалося отримати достовірні експериментальні оцінки SND . Водночас гарне узгодження моделі з експериментом у діапазоні, вільному від впливу радіозавад, дає підстави вважати, що модель коректно описує характеристики антени і в діапазоні нижче 10 МГц, де експериментальна перевірка занадто ускладнена.

Графіки, наведені на рис. 2 та 4, обчислено з використанням коректної формули для розрахунку яскравісної температури фонового випромінювання, наведеної в [21] і уточненої в [22]. З цих рисунків випливає, що найбільші розбіжності між зображеними кривими спостерігаються в смузі частот 25...35 МГц, де SND є помітно більшим за 10 дБ. У верхній частині частотного діапазону приземна антена демонструє найнижчий рівень SND (штрихова лінія) порівняно з іншими дослідженими висотами її розташування над поверхнею ґрунту. Зі зниженням частоти від 25 МГц штрихова лінія залишає найнижчу позицію та впевнено піднімається в середину пучка кривих, досягаючи його середини десь на частоті

тах 8...10 МГц. На жаль, рис. 2 не дає реальної змоги простежити відмінність кривих на частотах, менших за 8 МГц, оскільки всі вони тут майже співпадають. Тому на рис. 4 і подано ділянку смуги 3.5...8 МГц у розгорнутому вигляді, що дає можливість оцінити розбіжності в SND активних антен, розташованих на різних висотах.

На цьому рисунку видно, що штрихова лінія на 8 МГц лежить посередині пучка кривих, але зі зниженням частоти вона поступово наближається до його нижньої границі й нарешті біля 4 МГц виходить за межі пучка та далі залишається найнижчою. У діапазоні частот від 8 до 5 МГц штрихова лінія має SND менший лише на 1 дБ, ніж диполь з точкою живлення на висоті 3 м. За другим критерієм визначення робочої смуги нижня частота діапазону відповідає 7 МГц. За третім — 4.5 МГц. Порівняльний аналіз показує, що висота розташування точки живлення антени над поверхнею ґрунту істотно не впливає на чутливість антени. У такому випадку плечі антени можна поставити прямо на ґрунт і використовувати їх як опору. Запропоноване рішення значно спрощує застосування цих антен у космічних місіях для спостережень на Місяці.

2.4. Флуктуаційна чутливість нової антени

Розроблена антена є елементом радіоастрономічної системи, призначеної для дослідження космічного радіовипромінювання. Доцільно визначити, випромінювання яких саме об'єктів Всесвіту можна буде спостерігати після виведення цієї антени за межі земної атмосфери та іоносфери — наприклад, на орбіті Землі або на зворотному боці Місяця. Зараз на частотах нижче 10 МГц переважно здійснюється моніторинг сонячного радіовипромінювання, і є лише поодинокі випадки досліджень фонового радіовипромінювання Галактики та Юпітера.

На рис. 5 показано кількісну оцінку можливості спостережень різних джерел радіовипромінювання об'єктів Всесвіту. Чутливість елемента розраховувалася за формулою з урахуванням модельних характеристик антенного елемента.

По осі ординат на рис. 5 відкладено чутливість, яка визначається за формулою. Цей показник демонструє мінімальний потік радіовипромінювання космічного радіоджерела, який мож-

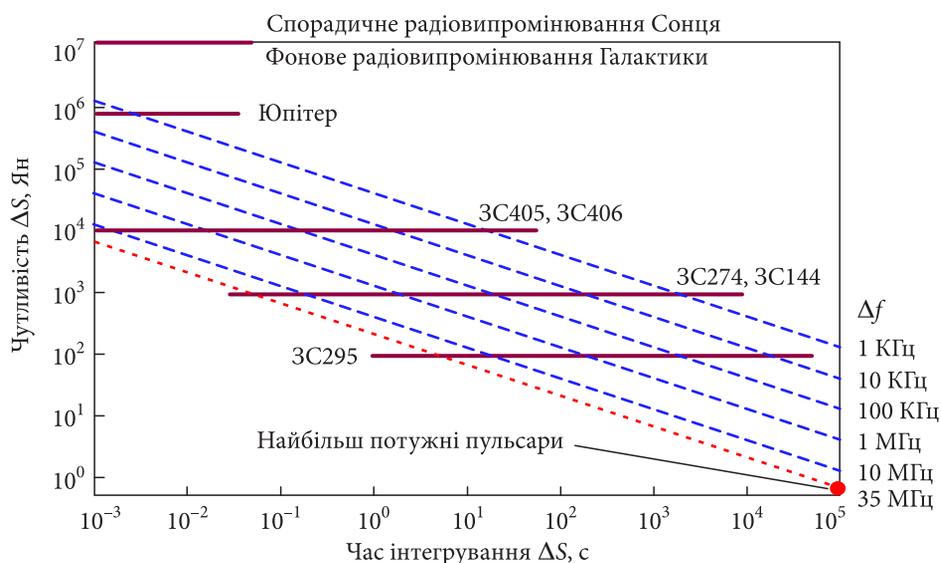


Рис. 5. Оцінка очікуваної чутливості спостережень різних космічних радіоджерел за допомогою нової антени

на виявити на тлі повного шуму системи. Повний шум включає як внутрішні шуми апаратури, так і зовнішні шуми, що надходять від космічного фону та атмосфери Землі. По горизонтальній осі (t) відкладено час інтегрування сигналу після детектора, що визначає ступінь накопичення даних для підвищення чутливості. Смуги пропускання приймача (Δf): 1 КГц, 10 КГц, 100 КГц, 1 МГц, 10 МГц і 35 МГц показано нахиленими штриховими лініями, що демонструють, як чутливість змінюється залежно від ширини смуги приймання.

Чутливості елемента достатньо не тільки для моніторингу спородичного радіовипромінювання Сонця, але й для виявлення спектральних характеристик радіовипромінювання двох яскравих залишків наднових нашої Галактики: 3C461 (Касіопея А) та 3C144 (Крабоподібна туманність). Крім того, потенційно можливі спостереження щонайменше трьох яскравих радіогалактик: 3C405 (Лебідь А), 3C274 (Діва А), 3C295. Варто зазначити, що дані про радіовипромінювання цих радіогалактик на частотах нижче 10 МГц наразі відсутні, що робить ці спостереження особливо цінними. При усередненні отриманих даних протягом більше доби, можливо, на межі чутливості, буде отримано усереднені імпульси найпотужніших пульсарів. Слід зауважити, що успішні спостереження залишків наднових і радіогалактик цією антеною можливо провести тільки за допомогою інтерферометрів і антенних

решіток, побудованих із таких антенних елементів. Подальше збільшення чутливості розробленої активної приземної антени є економічно недоцільним. Раціональним шляхом розвитку є об'єднання таких активних приземних антен у решітки та інтерферометри. Це забезпечує підвищення чутливості в \sqrt{N} разів (N — кількість елементів). Оскільки в діапазоні 6...40 МГц значення SND перевищує 3.8 дБ, тому приріст чутливості від об'єднання навіть двох антен ($\sqrt{2} \approx 1.41$) є вищим за будь-яке можливе вдосконалення параметрів одиночного елемента.

3. Радіоастрономічні спостереження

Оскільки створений антенний елемент при тестуванні показав цілком прийнятні характеристики, було вирішено перевірити його ефективність у реальних радіоастрономічних спостереженнях у земних умовах. Такі спостереження можуть дозволити впевнено стверджувати, що при виготовленні антени з матеріалів і компонентів, придатних для роботи в умовах космосу, антена буде працювати не гірше й на поверхні Місяця.

3.1. Дослідження добової зміни антенної температури

Хоча в низькочастотному діапазоні зовнішній шум формується різними джерелами (включно

з атмосферними завадами на нижчих частотах), Галактичне та Метагалактичне фонове радіовипромінювання становить значну частку цього шуму. Добова зміна Галактичного фонового радіовипромінювання дозволяє оцінити чутливість системи. Це можна перевірити за допомогою спостереження добової зміни (яскравісної) шумової температури антени, що виникає внаслідок нерівномірного розподілення фону Галактики по небесній сфері. Термін «шумова температура антени» традиційно використовується в радіотехніці для опису еквівалентної температури шуму, що надходить до приймача через антену. У випадках, коли цей шум зумовлено некогерентним фоновим випромінюванням (наприклад, Галактичним або атмосферним), його інтенсивність може бути фізично інтерпретована через «яскравісну температуру» — температуру, яку мало б абсолютно чорне тіло для створення такої ж спектральної інтенсивності. Тому в даному контексті вживання терміна «(яскравісна) шумова температура антени» підкреслює, що йдеться про шумоподібне випромінювання з фізично обґрунтованою температурною інтерпретацією. Якщо внесок власного шуму системи доволі малий, то зміну (яскравісної) шумової температури антени буде помітно на динамічному спектрі, отриманому в результаті спостережень навіть на одному диполі за рахунок добового обертання Землі [17, 18]. На рис. 6 показано запис добової зміни відносної (яскравісної) шумової температури фону для розробленої приземної антени та диполя антенної решітки УТР-2. Запис виконувався цифровим приймачем АDR [23] у смузі частот 0...55 МГц.

Загалом, порівняння шумових антенних температур двох елементів наочно демонструє, що активна приземна антена за чутливістю не поступається перевіреному часом диполу радіотелескопа УТР-2. Це порівняння підтверджує працездатність активної приземної антени на частотах вище 10 МГц, тобто в робочому діапазоні диполя радіотелескопа УТР-2, який, відповідно до [24, 25], не застосовується нижче 8 МГц.

Розроблена активна приземна антена працює в діапазоні коротких хвиль (КХ) (частоти: 3...30 МГц) і частково в ультракороткохвильовому (УКХ) діапазоні (30...40 МГц). Така широка смуга пропускання та висока чутливість у робо-

чій смузі дозволяють ефективно використовувати короткохвильовий радіошум для тестування антени. Короткохвильовий радіошум являє собою суперпозицію сигналів від різноманітних джерел (антропогенних, космічних і атмосферних), і кожен з них має свою унікальну сезонну, добову та географічну залежність (відповідно ІТУ-R P.372-13, 2016), дивись [26—29].

Варто зауважити, що у КХ-діапазоні антена охоплює частоти, які умовно поділяють на «денні хвилі» (12...30 МГц) та «нічні хвилі» (3...8 МГц) [30, 31]. Такий поділ зумовлено добовими змінами іоносфери під впливом сонячного (ультрафіолетового) випромінювання. Ця класифікація відображає, як динаміка іоносфери впливає на поширення радіохвиль у різний час доби, визначаючи, які частоти є найбільш ефективними для передачі сигналів на великі відстані. Різні механізми поширення «денних» і «нічних» хвиль, а також короткохвильовий радіошум як джерело випромінювання можуть бути використані для визначення робочої смуги частот антени. На рис. 6 показано динамічний спектр добової зміни шумової температури розробленої активної приземної антени, що додатково демонструє різну поведінку короткохвильового радіошуму нижче та вище частоти 10 МГц.

3.2. Аналіз динаміки короткохвильового радіошуму

3.2.1. Загальна характеристика добового циклу

Наведена нижче часова прив'язка морфологічних ознак радіошуму відповідає осінньому сезону (спостереження 6—7 листопада 2020 р.). Добова динаміка варіацій короткохвильового радіошуму визначається сезонними факторами, фазами сонячної активності та станом іоносфери [30, 31]. Добові варіації короткохвильового радіошуму, спостережені за допомогою розробленої активної приземної антени, демонструють чіткий циклічний характер, зумовлений впливом Сонця на іоносферу. Вранці, близько 06:10 (час місцевий), короткохвильовий радіошум починає поступово зміщуватися до вищих частот. Крім того, приблизно з 07:30 він поступово зникає з області частот порядку одиниць мегагерц. Об 11:00 радіошум практично відсутній у смузі

зі від 1 до 10 МГц. Водночас він переміщується в область вищих частот і до цього часу охоплює смугу 10...20 МГц, з меншою інтенсивністю — до 25 МГц. Період між 11:00 і 12:00 можна вважати межею, після якої радіошум починає поступово зміщуватися до нижчих частот. Близько 16:50 він спостерігається переважно на частотах нижче 10 МГц і зберігає таку частотну локалізацію протягом майже 13 годин. Вранці наступного дня, знову близько 06:10, радіошум починає зміщуватися до вищих частот. Подібна добова структура спостерігалася також у наступні дні (не показано), що підтверджує її стабільний характер.

3.2.2. Кореляція радіошуму з фазами Сонця та іоносферою

Для кращого розуміння цих змін необхідно враховувати сонячні фази: схід Сонця 06.11.2020 р. відбувся о 06:30, захід — о 16:03, а сонячний полудень — об 11:18. Спостерігається певне випередження між спектральною локалізацією короткохвильового радіошуму та фазами Сонця відносно Землі. Зокрема, хоча схід Сонця відбувається о 6:30, спектр радіошуму починає зміщуватися до вищих частот вже о 06:10, тобто на 20 хвилин раніше. Сонячний полудень об 11:18 наближено відповідає часу, коли максимум спектральної густини короткохвильового радіошуму припадає на частоти 20...25 МГц. Захід Сонця о 16:03, а зниження інтенсивності короткохвильового радіошуму на високих частотах розпочинається близько 15:50, тобто трохи раніше. Подальше зміщення спектра до нижчих частот відбувається так, що вже о 16:50 (через 47 хв після заходу Сонця) радіошум присутній лише в смугі від одиниць мегагерц до 10 МГц, а на частотах вище його вже не виявляється.

Таким чином, спектрограма (рис. 6) дає чітке уявлення про те, як іоносфера впливає на поширення короткохвильового радіошуму. Вона також відображує зміни максимально придатної частоти (МПЧ) [30, 31] та поглинання в D-шарі, що узгоджується з добовою динамікою спектральної локалізації шуму.

Нічний режим поширення (від заходу до сходу Сонця). Виникнення цього явища в нічний час у діапазоні «нічних хвиль» протягом майже 13 годин є класичним прикладом для низькочас-

тотних радіоастрономічних спостережень [32] у КХ-діапазоні. Після заходу Сонця (16:30) D-шар іоносфери поступово зникає, що усуває значне поглинання в діапазоні «нічних хвиль» і дозволяє далеким атмосферним завадам — зокрема від глобальних грозових центрів (наприклад, у Південній Америці або Африці) — безперешкодно досягати місця спостереження. Їхній внесок чітко помітний в смугі 3...10 МГц. У нічний період F-шари розташовуються вище, їхня іонізація знижується, і вони ефективніше відбивають «нічні хвилі». Водночас «денні хвилі» проходять крізь іоносферу або відбиваються надто слабо, тому короткохвильового радіошуму в цьому діапазоні радіохвиль практично не спостерігається.

Ранковий перехід (вплив сходу Сонця). Зранку спектр короткохвильового радіошуму поступово зміщується від «нічних хвиль» до «денних хвиль», що є наслідком сходу Сонця. Як тільки сонячне випромінювання починає іонізувати F-шар іоносфери, електронна щільність зростає. Це призводить до збільшення МПЧ. У цей час діапазон «денних хвиль» стає доступним для далекого проходження, і починається спостереження характерного радіошуму у цьому діапазоні, зокрема на частотах вище 10 МГц. Випередження сходу Сонця пояснюється тим, що іоносфера розташована значно вище поверхні Землі й піддається впливу сонячного випромінювання ще до того, як Сонце з'являється над горизонтом. Цей ефект пов'язано з явищем, яке має назву «сонячного термінатора» — межі між освітленою та затемненою частинами атмосфери, яка проходить через іоносферу раніше, ніж стає помітною на земній поверхні [33].

Денний режим поширення. Протягом дня спектр короткохвильового радіошуму поступово зникає з області частот, характерних для «нічних хвиль», і зміщується в область «денних хвиль». У проміжку від 11:00 до 12:00 він практично відсутній у діапазоні «нічних хвиль». Тобто вдень у діапазоні «нічних хвиль» завад стає менше, що є незвичним для низькочастотної радіоастрономії. Цей ефект чітко помітно лише на новій антені завдяки її більшій чутливості та ширшому робочому діапазону, тоді як на диполі УТР-2 він не виявляється. Це явище пов'язано з появою та посиленням D-шару. Після сходу Сонця D-шар починає активно формуватися та ущільнюватися.

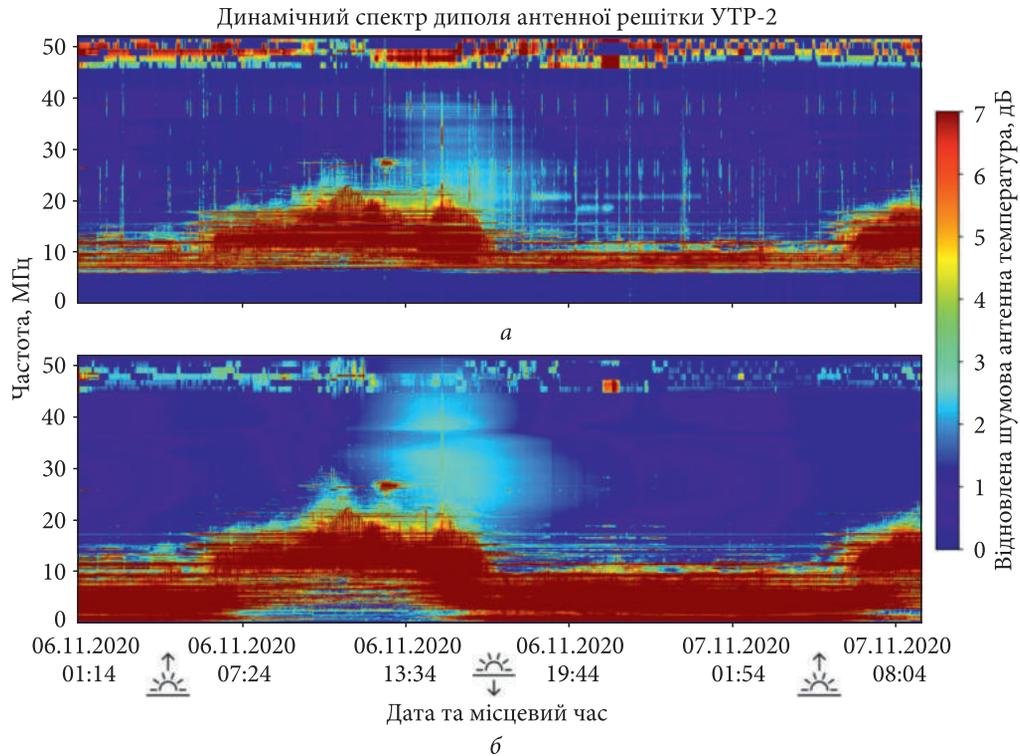


Рис. 6. Динамічні спектри добової зміни шумової температури розробленої приземної антени (нижня панель) та диполя антенної решітки УТР-2 (верхня панель), отримані з 6 по 7 листопада 2020 р. на Радіоастрономічній обсерваторії ім. С.Я. Брауде

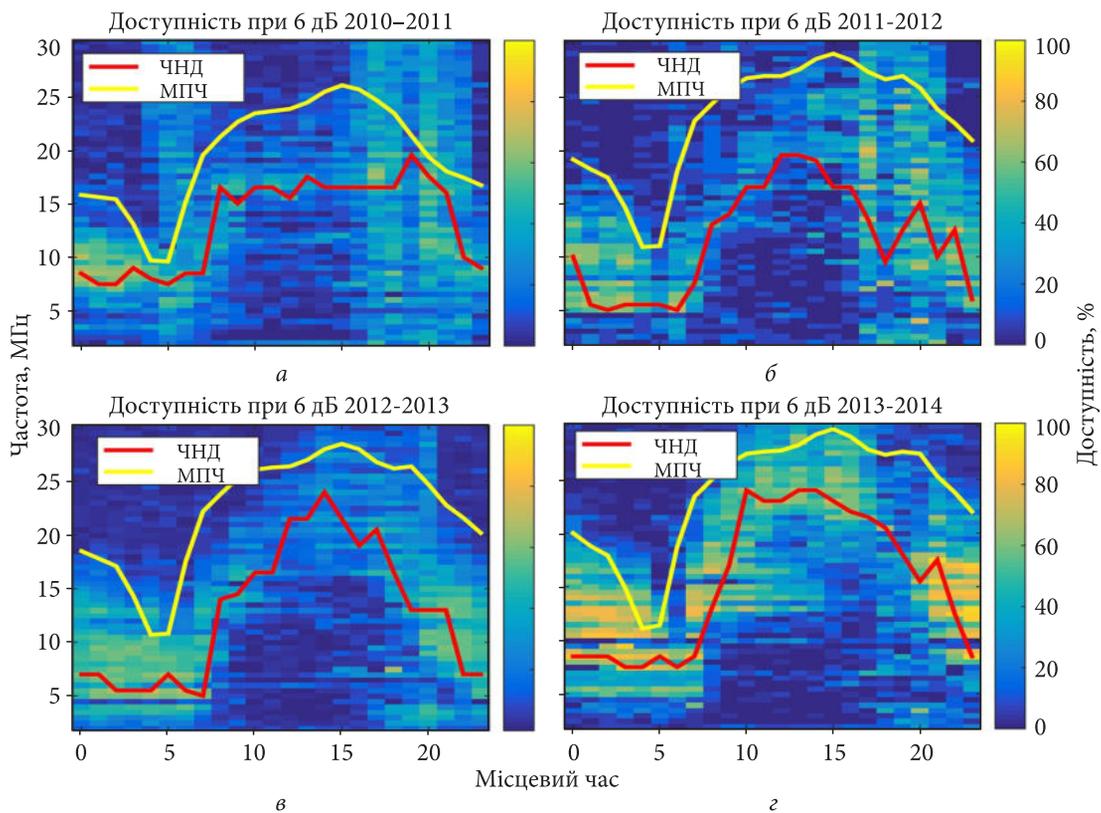


Рис. 7. Добові зміни МПЧ, отримані за допомогою станцій VIS (рисунок адаптовано з [35])

Він поглинає радіохвилі всього КХ-діапазону, проте ефект поглинання найбільш виражений на нижчих частотах [30, 31, 34]. Тому короткохвильовий радіошум і будь-які інші сигнали в діапазоні «нічних хвиль» значно послаблюються в денний час. Близько сонячного полудня (11:18) МПЧ досягає свого денного максимуму. Іоносфера є найбільш сильно іонізованою, і вона ефективно відбиває «денні хвилі». Саме тому спектр короткохвильового радіошуму переміщується вгору по частоті та спостерігається в частотному діапазоні 10...20 МГц і навіть до 25 МГц. Цей час є найкращим для денного проходження далеких атмосферних завад, які реєструються засобами низькочастотної радіоастрономії.

Вечірній перехід. Після сонячної кульмінації інтенсивність впливу на іоносферу сонячного випромінювання поступово зменшується через зміну кута падіння променів і збільшення товщини атмосфери, яку вони проходять. Це призводить до поступового зниження іонізації F-шару і, як наслідок, падіння МПЧ. У цей час вплив «денних хвиль» поступово зникає, і спектр короткохвильового радіошуму зміщується до нижчих частот. Близько 50 хвилин після заходу Сонця (приблизно о 16:50) завершується добовий цикл: D-шар повністю зникає, усуваючи поглинання у випадку «нічних хвиль». Водночас МПЧ падає настільки, що «денні хвилі» (вище 10 МГц) вже не відбиваються F-шаром. Ми повертаємося до нічного режиму поширення, де домінують «нічні хвилі», які стають основним джерелом атмосферних завад.

Наші спостереження відповідають поведінці іоносфери в осінньо-зимовий період, коли домінують добові зміни. Вони добре корелюють із циклом поширення як для «денних хвиль», так і для «нічних хвиль», що визначається формуванням і зникненням D-шару та зміною МПЧ для трас поширення радіохвиль.

3.3. Порівняння з даними іоносферного зондування

Для порівняння та підтвердження наших спостережень на рис. 7 наведено результати роботи [35], які ілюструють добові зміни МПЧ, отримані за допомогою станцій вертикального іоносферного зондування Vertical Incidence Sounding (VIS).

У згаданій статті іоносферний канал досліджується з точки зору доступності певних частот у часі. Для цього використовується мережа із семи вертикальних іоносферних зондів VIS та один нахилений іоносферний зонд Oblique Incidence Sounder (OIS). За даними вертикальних радарів визначається МПЧ, тоді як дані нахилених радарів додатково дозволяють визначити частоту надійної доступності (ЧНД). Метою роботи [35] є порівняння інформації від системи OIS з аналізом даних системи VIS, щоб запропонувати оптимальні робочі частоти, уникаючи при цьому необхідності нахиленого зондування та використовуючи лише дані станцій VIS. Важливо зазначити, що використання розробленої активної приземної антени, спільно з існуючими станціями VIS, забезпечує ефективну інструментальну базу для реалізації цього підходу. Здатність активної приземної антени реєструвати добові зміни короткохвильового радіошуму, які корелюють з іоносферними параметрами (такими як МПЧ та вплив D-шару), надає додатковий, пасивний метод моніторингу іоносферного каналу. Це потенційно може доповнити існуючі системи активного зондування та зробити прогнозування поширення радіохвиль доступнішим, зменшуючи залежність від складних і дорогих методів.

Висновки

За результатами проведених досліджень і порівнянь із результатами інших досліджень ми дійшли до наступних ключових висновків щодо нової низькочастотної радіоастрономічної антени.

Оцінка ефективності КХ-радіозв'язку. Розроблена активна приземна антена демонструє високу ефективність у моніторингу короткохвильового радіошуму, який є прямим відображенням стану іоносфери для поширення радіохвиль. Це робить її надзвичайно корисною для прогнозування ефективності КХ радіозв'язку. Завдяки безперервному відстеженню змін у діапазонах частот «денних» і «нічних» хвиль можна визначити оптимальні частоти для проведення зв'язку в певний час доби.

Розуміння поведінки іоносфери. Розроблена антена дає можливість отримувати цінні дані для поглибленого розуміння поведінки іоносфери в різних умовах. Це включає вивчення її реакції на

різні геофізичні явища, такі як сонячні спалахи, магнітні бурі, полярні сніва та інші збурення, що впливають на іонізацію шарів D і F іоносфери.

Перевірка та покращення іоносферних моделей. Отримані дані можуть бути застосовані для оцінки та покращення існуючих іоносферних моделей, що використовуються для прогнозування поширення КХ-радіохвиль. Можливість пасивного моніторингу змін МПЧ, що визначається властивостями F2-шару та впливом D-шару, дозволяє більш точно калібрувати та вдосконалювати ці моделі.

Унікальність методу тестування. Застосування короткохвильового радіошуму як природного джерела тестового сигналу для перевірки антени є інноваційним і економічно вигідним методом. Експериментально підтверджено, що антена ефективно працює як у діапазоні частот «денних хвиль» (вище 10 МГц), так і в діапазоні

«нічних хвиль» (нижче 10 МГц). Це свідчить про її досить широку смугу пропускання та високу чутливість у всьому робочому діапазоні.

Конструктивні переваги. З конструктивної точки зору нова антена також має значні переваги перед елементом радіотелескопа УТР-2. Вона є набагато менше металомісткою та має значно менші габаритні розміри, хоча антена містить МШП, який вимагає додаткового живлення. Експериментально доведено, що відсутність опорної стійки майже не впливає на її чутливість, що робить її ідеальною для використання в умовах, де розмір і вага є критичними параметрами, наприклад, у майбутніх космічних місіях.

Ці висновки підкреслюють високу перспективність розробленої антени як для радіоастрономічних досліджень, так і для моніторингу іоносфери та прогнозування поширення радіохвиль у наземних і космічних умовах.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Lin Y., Yang W., Zhang H. Return to the Moon: New perspectives on lunar exploration. *Innov.* 2021. Vol. 2, Iss. 1. 100063. DOI: 10.1016/j.xinn.2020.100063
2. Burns J.O. Transformative science from the lunar farside: observations of the dark ages and exoplanetary systems at low radio frequencies. *Philos. Trans. R. Soc. A: Math. Phys. Eng. Sci.* 2021. Vol. 379, Iss. 2188. 20190564. DOI: 10.1098/rsta.2019.0564
3. Bale S.D., Bassett N., Burns J. O., Jones J.D., Goetz K., Hellum-Bye C., Hermann S., Hibbard J., Maksimovic M., McLean R., Monsalve R., O'Connor P., Parsons A., Pulupa M., Pund R., Rapetti D., Rotermund K.M., Saliwanchik B., Slosar A., Sundkvist D., Suzuki A. LuSEE 'Night': The Lunar Surface Electromagnetics Experiment. *URSI General Assembly and Scientific Symposium (GASS)*. 2023. arXiv:2301.10345. DOI: 10.48550/arXiv.2301.10345
4. Polidan R.S., Burns J.O., Ignatiev A., Hegedus A., Pober J., Mahesh N., Chang T.-C., Hallinan G., Yuhong N., Bowman J. FarView: An in-situ manufactured lunar far side radio array concept for 21-cm Dark Ages cosmology. *Adv. Space Res.* 2024. Vol. 74, Iss. 1. P. 528–546. DOI: 10.1016/j.asr.2024.04.008
5. Shkuratov Y.G., Konvalenko 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., Yatskiy Y.S., Videen G., Zarka P., Rucker H.O. A twofold mission to the moon: Objectives and payloads. *Acta Astronaut.* 2019. Vol. 154. P. 214–226. DOI: 10.1016/j.actastro.2018.03.038
6. Бубнов І.М., Коноваленко О.О., Токарський П.Л., Корольов О.М., Єрін С.М., Станіславський Л.О. Створення та апробація низькочастотної радіоастрономічної антени для дослідження об'єктів Всесвіту зі зворотного боку Місяця. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2021. Т. 26, № 3. С. 197–210. DOI: 10.15407/rpra26.03.197
7. Mimoun D., Wicczorek M.A., Alkalai L., Banerdt W.B., Baratoux D., Bougeret J.-L., Bouley S., Cecconi B., Falcke H., Flohrer J., Garcia R.F., Grimm R., Grott M., Gurvits L., Jaumann R., Johnson C.L., Knapmeyer M., Kobayashi N., Konvalenko A., Lawrence D., Le Feuvre M., Lognonné P., Neal C., Oberst J., Olsen N., Röttgering H., Spohn T., Vennerstrom S., Woan G., Zarka P. Farside explorer: unique science from a mission to the farside of the Moon. *Exp. Astron.* 2012. Vol. 33, Iss. 2–3. P. 529–585. DOI: 10.1007/s10686-011-9252-3
8. Zarka P., Bougeret J.-L., Briand C., Cecconi B., Falcke H., Girard J., Griefmeier J.-M., Hess S., Klein-Wolt M., Konvalenko A., Lamy L., Mimoun D., Aminaei A. Planetary and exoplanetary low frequency radio observations from the Moon. *Planet. Space Sci.* 2012. Vol. 74, Iss. 1. P. 156–166. DOI: 10.1016/j.pss.2012.08.004
9. Лавров В.І., Князев Г.А. *Приземні та підземні антени*. Київ: Наук. думка, 1980. 156 с.
10. Tokarsky P.L., Konvalenko A.A., Yerin S.N., 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, Iss. 12. P. 7304–7311. DOI: 10.1109/TAP.2019.2927841

11. Azami M., Aubin-Fournier P.-L., Hojjati M., Skonieczny K. Additive Manufacturing of PEEK/Lunar Regolith Composites for Sustainable Lunar Manufacturing. *arXiv preprint*. 2025. arXiv:2508.00894.
12. Does NASA Use Carbon Fiber? / HPL Machining. 2025. URL: <https://hplmachining.com/uk/blog/does-nasa-use-carbon-fiber/> (дата звернення: 18.10.2025).
13. Vecchio A., Brinkerink C., Karapakula S., Klein-Wolt M., Falcke H., Boonstra A.J., Bentum M., Ruiter M., Rotteveel J., Bertels E., Ping J., Chen L. The Netherlands-China Low-frequency explorer (NCLE), 2022. *Proc. 3rd URSI AT-AP-RASC*. (Gran Canaria, Spain, 29 May – 3 June 2022). URL: <https://www.ursi.org/proceedings/procAT22/ATAPRASC2022-papers/D7GX06L4RQ.pdf>
14. Karapakula S., Brinkerink C., Vecchio A., Poursheghaghghi H.R., Dolron P., Jordans R., Bertels E., Aalbers G., Ruiter M., Boonstra A. J., Bentum M., Prinsloo D., Arts M., Bast J., Damstra S., van Duin A., Ebbendorf N., van der Marel H., Morawietz J., Witviers R., Poiesz W., van Dongen R., Cecconi B., Zarka P., Dekkali M., Chen L., Wang M., Zhang M., Huang M., Yan Y., Dong L., Tan B., Zhang L., Xiong L., Sun J., Zhang H., Ping J., Wolt M.K., Falcke H. Architecture Design and Ground Performance of Netherlands-China Low-Frequency Explorer. *Radio Sci.* 2024. Vol. 59, Iss. 1. e2023RS007906. DOI: 10.1029/2023RS007906
15. Sridharan T.K., Lehmensiek R., Schwarz S., Marrone D.P. Antenna Technology Readiness for the Black Hole Explorer (BHEX) Mission. *arXiv preprint*. 2025. arXiv:2504.15560.
16. Konovalenko A.A., Falkovich I.S., Kalinichenko N.N., Gridin A.A., Bubnov I.N., Lecacheux A., Rosolen C., Rucker H.O. Thirty-Element Active Antenna Array as a Prototype of a Huge Low-Frequency Radio Telescope. *Exp. Astron.* 2003. Vol. 16, Iss. 3. P. 149–164. DOI: 10.1007/s10686-003-0030-8
17. Falkovich I.S., Konovalenko A.A., Gridin A.A., Sodin L.G., Bubnov I.N., Kalinichenko N.N., Rashkovskii S.L., Mukha D.V., Tokarsky P.L. Wide-band high linearity active dipole for low frequency radio astronomy. *Exp. Astron.* 2011. Vol. 32, Iss. 2. P. 127–145. DOI: 10.1007/s10686-011-9256-z
18. Hicks B.C., Paravastu-Dalal N., Stewart K.P., Erickson W.C., Ray P.S., Kassim N.E., Burns S., Clarke T., Schmitt H., Craig J., Hartman J., Weiler K.W. A Wide-Band, Active Antenna System for Long Wavelength Radio Astronomy. *Publ. Astron. Soc. Pac.* 2012. Vol. 124, Iss. 920. P. 1090–1104. DOI: 10.1086/668121
19. ITU-R Recommendation P.372-16. Radio Noise [pdf]. International Telecommunication Union, Geneva, 2022. 66 p. URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.372-16-202208-S!!PDF-E.pdf
20. Ellingson S.W. Antennas for the Next Generation of Low-Frequency Radio Telescopes. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2005. Vol. 53, Iss. 8. P. 2480–2489. DOI: 10.1109/TAP.2005.852532
21. Cane H.V. Spectra of the non-thermal radio radiation from the galactic polar regions. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 1979. Vol. 189, Iss. 3. P. 465–478. DOI: 10.1093/mnras/189.3.465
22. Duric N., Theodorou A., Smith K., Zouaoui G., Harris M., Junor W., Gaussiran T. *RFI report for the U.S. SouthWest*. 2003. URL: ftp://gemini.haystack.edu/pub/lofar/siting_docs/SWUS_RFI.doc (дата звернення: 11.07.2021).
23. 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., Griefsmeier J.-M. Digital Receivers for Low-Frequency Radio Telescopes UTR-2, URAN, GURT. *J. Astron. Instrum.* 2016. Vol. 5, Iss. 4. 1641010. DOI: 10.1142/S2251171716410105
24. 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.
25. 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.
26. Berngardt O.I., St-Maurice J.-P., Ruohoniemi J.M., Marchaudon A. Seasonal and diurnal dynamics of radio noise for 8–20 MHz poleward-oriented mid-latitude radars. *Radio Sci.* 2022. Vol. 57. e2021RS007338. DOI: 10.1029/2021RS007338
27. Pederick L.H., Cervera M.A. A directional HF noise model: Calibration and validation in the Australian region. *Radio Sci.* 2016. Vol. 51. P. 25–39. DOI: 10.1002/2015RS005842
28. World Distribution and Characteristics of Atmospheric Radio Noise. *International Radio Consultative Committee*. Geneva: International Telecommunication Union, 1964. Vol. 322.
29. Recommendation ITU-R P.372-11: Radio noise. *International Telecommunication Union*. Geneva: ITU, 2013.
30. Dolukhanov M.P. *Propagation of radio waves*. Moscow: Sov. Radio Publ., 1951. 544 p.
31. Davies K. Ionospheric Radio Propagation. *NBS Monograph 80*. Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office, 1965. 470 p.
32. Коноваленко О.О., Єрін С.М., Бубнов І.М., Токарський П.Л., Захаренко В.В., Ульянов О.М., Сидорчук М.А., Стюпкін С.В., Грідін А.О., Квасов Г.В., Колядін В.Л., Мельник В.М., Доровський В.В., Калініченко М.М., Литвиненко Г.В.,

- Зарка Ф., Дені Л., Жіраар Ж., Рукер Г.О., Панченко М., Станіславський О.О., Христенко О.Д., Муха Д.В., Резніченко О.М., Лісаченко В.М., Борцов В.В., Браженко А.І., Васильєва Я.Ю., Скорик А.О., Шевцова А.І., Милостна К.Ю. Астрофізичні дослідження за допомогою малорозмірних низькочастотних радіотелескопів нового покоління. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2016. Т. 21, № 2. С. 83–131. DOI: 10.15407/rpra21.02
33. Colonna R., Tramutoli V. A. New model of solar illumination of Earth's atmosphere during night-time. *Earth*. 2021. Vol. 2. P. 191–207. DOI: 10.3390/earth2020012
34. Zawdie K.A., Drob D.P., Siskind D.E., Coker C. Calculating the absorption of HF radio waves in the ionosphere. *Radio Sci*. 2017. Vol. 52. P. 767–783. DOI: 10.1002/2017RS006256
35. Alsina-Pagès R.M., Hervás M., Altadill D., Calduch J., Blanch E. Vertical and oblique ionospheric soundings performance comparison over the 12,760 km transequatorial HF link between Antarctica and Spain. *Radio Sci*. 2017. Vol. 52. P. 498–510. DOI: 10.1002/2016RS006232

Стаття надійшла 23.12.2025

REFERENCES

1. Lin, Y., Yang, W., and Zhang, H., 2021. Return to the Moon: New perspectives on lunar exploration. *Innov.*, **2**(1), 100063. DOI: 10.1016/j.xinn.2020.100063
2. Burns, J.O., 2021. Transformative science from the lunar farside: observations of the dark ages and exoplanetary systems at low radio frequencies. *Philos. Trans. R. Soc. A: Math. Phys. Eng. Sci.*, **379**(2188), 20190564. DOI: 10.1098/rsta.2019.0564
3. Bale, S.D., Bassett, N., Burns, J.O., Jones, J.D., Goetz, K., Hellum-Bye, C., Hermann, S., Hibbard, J., Maksimovic, M., McLean, R., Monsalve, R., O'Connor, P., Parsons, A., Pulupa, M., Pund, R., Rapetti, D., Rotermund, K.M., Saliwanchik, B., Slosar, A., Sundkvist, D., and Suzuki, A., 2023. LuSEE 'Night': The Lunar Surface Electromagnetics Experiment. *URSI General Assembly and Scientific Symposium (GASS)*. arXiv:2301.10345. DOI: 10.48550/arXiv.2301.10345
4. Polidan, R.S., Burns, J.O., Ignatiev, A., Hegedus, A., Pober, J., Mahesh, N., Chang, T.-C., Hallinan, G., Yuhong, N., and Bowman, J., 2024. FarView: An in-situ manufactured lunar far side radio array concept for 21-cm Dark Ages cosmology. *Adv. Space Res.*, **74**(1), pp. 528–546. DOI: 10.1016/j.asr.2024.04.008
5. 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., Lytyvnenko, L.N., Yatskiy, Y.S., Videen, G., Zarka, P., and Rucker, H.O., 2019. A twofold mission to the moon: Objectives and payloads. *Acta Astronaut.*, **154**, pp. 214–226. DOI: 10.1016/j.actaastro.2018.03.038
6. Bubnov, I.N., Konovalenko, O.O., Tokarsky, P.L., Korolev, O.M., Yerin, S.M., and Stanislavsky, L.O., 2021. Creation and ap-probation of a low-frequency radio astronomy antenna for studying objects of the Universe from the farside of the Moon. *Radio Phys. Radio Astron.*, **26**(3), pp. 197–210. DOI: 10.15407/rpra26.03.197
7. Mimoun, D., Wiczorek, M.A., Alkalai, L., Banerdt, W.B., Baratoux, D., Bougeret, J.-L., Bouley, S., Cecconi, B., Falcke, H., Flohrer, J., Garcia, R.F., Grimm, R., Grott, M., Gurvits, L., Jaumann, R., Johnson, C.L., Knapmeyer, M., Kobayashi, N., Konovalenko, A., Lawrence, D., Le Feuvre, M., Lognonné, P., Neal, C., Oberst, J., Olsen, N., Röttgering, H., Spohn, T., Vennerstrom, S., Woan, G., and Zarka, P., 2012. Farside explorer: unique science from a mission to the farside of the Moon. *Exp. Astron.*, **33**(2–3), pp. 529–585. DOI: 10.1007/s10686-011-9252-3
8. Zarka, P., Bougeret, J.-L., Briand, C., Cecconi, B., Falcke, H., Girard, J., Griefsmeier, 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.*, **74**(1), pp. 156–166. DOI: 10.1016/j.pss.2012.08.004
9. Lavrov, V.I., and Knyazev, G.A., 1980. *Surface and underground antennas*. Kyiv, Ukraine: Naukova Dumka (in Ukrainian).
10. 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.*, **67**(12), pp. 7304–7311. DOI: 10.1109/TAP.2019.2927841
11. Azami, M., Aubin-Fournier, P.-L., Hojjati, M., and Skonieczny, K., 2025. Additive Manufacturing of PEEK/Lunar Regolith Composites for Sustainable Lunar Manufacturing. *arXiv preprint*. arXiv:2508.00894.
12. HPL Machining, 2025. *Does NASA Use Carbon Fiber?* [online] Available at: <https://hplmachining.com/uk/blog/does-nasa-use-carbon-fiber/> (Accessed: 18 Oct 2025).
13. Vecchio, A., Brinkerink, C., Karapakula, S., Klein-Wolt, M., Falcke, H., Boonstra, A.J., Bentum, M., Ruiten, M., Rotteveel, J., Bertels, E., Ping, J., and Chen, L., 2022. The Netherlands-China Low-frequency explorer (NCLE), 2022. In: *Proc. 3rd URSI AT-AP-RASC*. Gran Canaria, Spain, 29 May – 3 June 2022.
14. Karapakula, S., Brinkerink, C., Vecchio, A., Pourshaghagh, H.R., Dolron, P., Jordans, R., Bertels, E., Aalbers, G., Ruiten, M., Boonstra, A.J., Bentum, M., Prinsloo, D., Arts, M., Bast, J., Damstra, S., van Duin, A., Ebbendorf, N., van der Marel, H., Morawietz, J., Witvers, R., Poiesz, W., van Dongen, R., Cecconi, B., Zarka, P., Dekkali, M., Chen, L., Wang, M., Zhang, M., Huang, M., Yan, Y., Dong, L., Tan, B., Zhang, L., Xiong, L., Sun, J., Zhang, H., Ping, J., Wolt, M.K., and Falcke, H., 2024. Architecture Design and Ground Performance of Netherlands-China Low-Frequency Explorer. *Radio Sci.*, **59**(1), e2023RS007906. DOI: 10.1029/2023RS007906

15. Sridharan, T.K., Lehmensiek, R., Schwarz, S., and Marrone, D.P., 2025. Antenna Technology Readiness for the Black Hole Explorer (BHEX) Mission. *arXiv preprint*. arXiv:2504.15560.
16. 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.* **16**(3), pp. 149–164. DOI: 10.1007/s10686-003-0030-8
17. 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.*, **32**(2), pp. 127–145. DOI: 10.1007/s10686-011-9256-z
18. Hicks, B.C., Paravastu-Dalal, N., Stewart, K.P., Erickson, W.C., Ray, P.S., Kassim, N.E., Burns, S., Clarke, T., Schmitt, H., Craig, J., Hartman, J., and Weiler, K.W., 2012. A Wide-Band, Active Antenna System for Long Wavelength Radio Astronomy. *Publ. Astron. Soc. Pac.*, **124**(920), pp. 1090–1104. DOI: 10.1086/668121.
19. ITU-R Recommendation P.372-16, 2022. *Radio Noise* [pdf]. International Telecommunication Union, Geneva. [online] Available at: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.372-16-202208-S!!PDF-E.pdf
20. Ellingson, S.W., 2005. Antennas for the Next Generation of Low-Frequency Radio Telescopes. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **53**(8), pp. 2480–2489. DOI: 10.1109/TAP.2005.852532
21. Cane, H.V., 1979. Spectra of the non-thermal radio radiation from the galactic polar regions. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **189**(3), pp. 465–478. DOI: 10.1093/mnras/189.3.465
22. Duric, N., Theodorou, A., Smith, K., Zouaoui, G., Harris, M., Junor, W., and Gaussiran, T., 2003. *RFI report for the U.S. SouthWest*. [online] Available at: ftp://gemini.haystack.edu/pub/lofar/siting_docs/SWUS_RFI.doc (Accessed: 11 July 2021).
23. 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., Vasyilkivskiy, 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 Griefmeier, J.-M., 2016. Digital Receivers for Low-Frequency Radio Telescopes UTR-2, URAN, GURT. *J. Astron. Instrum.*, **5**(4), 1641010. DOI: 10.1142/S2251171716410105
24. Braude, S.Y., Men, A.V., Sodin, L.G., 1978. Decameter wave radio telescope UTR-2. In: A.A. Pistolkors, ed. 1978. *Antennas*. Moscow: Svyaz' Publ. 26, pp. 3–15.
25. 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. Pistolkors, ed. 1978. *Antennas*. Moscow: Svyaz' Publ. 26, pp. 15–57.
26. Bergardt, O.I., St-Maurice, J.-P., Ruohoniemi, J.M., and Marchaudon, A., 2022. Seasonal and diurnal dynamics of radio noise for 8–20 MHz poleward-oriented mid-latitude radars. *Radio Sci.*, **57**, e2021RS007338. DOI: 10.1029/2021RS007338
27. Pederick, L.H., and Cervera, M.A., 2016. A directional HF noise model: Calibration and validation in the Australian region. *Radio Sci.*, **51**, pp. 25–39. DOI: 10.1002/2015RS005842
28. International Radio Consultative Committee, 1964. *World Distribution and Characteristics of Atmospheric Radio Noise*. Geneva: International Telecommunication Union. 322.
29. International Telecommunication Union, 2013. *Recommendation ITU-R P.372-11: Radio noise*. Geneva: ITU.
30. Dolukhanov, M.P., 1951. *Propagation of radio waves*. Moscow: Sov. radio. 544 p.
31. Davies, K., 1965. *Ionospheric Radio Propagation*. NBS Monograph 80. Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office.
32. Konovalenko, A.A., Yerin, S.M., Bubnov, I.M., 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., Mylostna, K.Y., 2016. Astrophysical research with new-generation small-scale low-frequency radio telescopes. *Radio Phys. Radio Astron.*, **21**(2), pp. 83–131. DOI: 10.15407/rpra21.02
33. Colonna, R., and Tramutoli, V.A., 2021. New model of solar illumination of Earth's atmosphere during night-time. *Earth*, **2**, pp. 191–207. DOI: 10.3390/earth2020012
34. Zawdie, K.A., Drob, D.P., Siskind, D.E., and Coker, C., 2017. Calculating the absorption of HF radio waves in the ionosphere. *Radio Sci.*, **52**, pp. 767–783. DOI: 10.1002/2017RS006256
35. Alsina-Pagès, R.M., Hervás, M., Altadill, D., Calduch, J., and Blanch, E., 2017. Vertical and oblique ionospheric soundings performance comparison over the 12,760 km transequatorial HF link between Antarctica and Spain. *Radio Sci.*, **52**, pp. 498–510. DOI: 10.1002/2016RS006232

Received 23.12.2025

*I.M. Bubnov, O.O. Stanislavsky, S.M. Yerin, P.L. Tokarsky, O.O. Konovalenko,
L.O. Stanislavsky, O.S. Belov*

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

TERRESTRIAL INVESTIGATION OF THE LOW-FREQUENCY
SENSITIVITY OF A RADIO ASTRONOMICAL ANTENNA PROPOSED
FOR LUNAR FAR-SIDE OBSERVATIONS OF COSMIC RADIO EMISSIONS

Subject and Purpose. Theoretical and experimental studies of an active antenna element, seen as a part of the future low-frequency radio telescope for an observatory on the lunar far-side. The project is focused on design simplification. The objective of the research is to provide for a high fluctuational sensitivity of the telescope while minimizing antenna's mass and dimensions, thereby facilitating its delivery and deployment on the lunar surface.

Methods and Methodology. To develop an antenna element up-scaled from the GURT prototype for 4...40 MHz, it was proposed to exclude the three-meter vertical support, using the arms of the crossed dipoles as load-bearing elements. Effectiveness was evaluated through estimating the antenna's sensitivity, specifically by applying the criterion which proceeds from estimates of excess of the external over the internal noise temperature. Terrestrial experiments used short-wave radio noise as a virtual "free generator", which allowed determining characteristics of the antenna over a wide frequency range. This method enabled evaluating the antenna's operation under actual interference conditions governed by the state of ionospheric layers D and F2.

Results. Numerical analysis and measurements showed that the proposed design, devoid of the support rack, does not significantly degrade the antenna's sensitivity, allowing efficient reception in the 7...40 MHz range. Experiments also demonstrated possibility of operation below 7 MHz, although terrestrial effectiveness is limited by local radio interference. Under lunar conditions, where such interference is absent, additional prospects for efficient observations are open. The data confirm the antenna's ability to follow the impact of geophysical phenomena on ionospheric parameters.

Conclusions. The results confirm effectiveness of the simplified active antenna design and suitability for lunar missions. The antenna can be employed for monitoring solar radiation and studying space radio sources in the terrestrial environment. Removal of the mast has made the modification more compact than the GURT prototype, which is critical for space transportation.

Keywords: *active antenna, ionosphere, F2 layer, the Moon, radio astronomical observations.*