

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra28.02.117>
УДК 520.6.05+520.6.22+520.626.05+520.27+523.985.7-77

В.В. Доровський¹, В.М. Мельник¹, А.І. Браженко²

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

²Полтавська гравіметрична обсерваторія Інституту геофізики
ім. С.І. Субботіна НАН України
вул. Мясоедова, 27/29. м. Полтава, 36014, Україна
E-mail: brazhai@gmail.com

НАЗЕМНА ПІДТРИМКА КОСМІЧНОЇ МІСІЇ *PARKER* УКРАЇНСЬКИМИ НИЗЬКОЧАСТОТНИМИ РАДІОТЕЛЕСКОПАМИ

Предмет і мета роботи. *Спорадичне радіовипромінювання Сонця в максимально можливій смузі частот містить важливу інформацію про параметри джерел цього випромінювання, сонячної корони та їхні варіації внаслідок активних процесів, що відбуваються на Сонці. Саме цим зумовлено запуски в останні роки космічних місій, спрямованих на вивчення Сонця та сонячної корони, таких як PSP (Parker Solar Probe) і Solar Orbiter. Метою цієї роботи є демонстрація ефективності наземної підтримки космічних місій, перш за все PSP, за допомогою великих українських радіотелескопів декаметрового діапазону. Ще однією метою роботи є проведення крос-калібрування радіометра космічної місії за каліброваними даними наземного радіотелескопа.*

Методи та методологія. *Одним із найпоширеніших методів дистанційної діагностики властивостей сонячної корони є вивчення параметрів радіовипромінювання, джерела якого знаходяться в короні Сонця на різних геліовисотах. Методика спільних наземно-космічних спостережень полягає в одночасному спостереженні окремих подій та їхньому аналізі в максимально широкій смузі частот під час максимального наближення апарата PSP до Сонця. При цьому спостереження в спільній смузі частот пропонується використовувати для калібрування бортових радіоприймачів.*

Результати. *Обґрунтовано методику планування спільних наземно-космічних спостережень. За даними радіотелескопів УТР-2, УРАН-2 і зонда PSP отримано динамічні та поляризаційні спектри сплесків 9 червня 2020 року, проведено ідентифікацію та співставлення окремих сплесків. Одержано спільний динамічний спектр сплесків у смузі частот 0.5...32 МГц. За допомогою каліброваних даних наземних радіотелескопів проведено крос-калібрування приймача HFR модуля FIELDS-PSP у смузі частот 10...18 МГц.*

Висновки. *Показано ефективність наземної підтримки місії PSP за допомогою великих українських радіотелескопів, наведено приклади спільних спостережень, продемонстровано методику крос-калібрування приймачів модуля FIELD-PSP. Наведено перспективи подальшої наземної підтримки сонячних космічних місій.*

Ключові слова: *радіотелескоп УТР-2, космічний зонд PSP, наземна підтримка, спектральна густина, потік, калібрування.*

Ц и т у в а н н я: Доровський В.В., Мельник В.М., Браженко А.І. Наземна підтримка космічної місії *Parker* українськими низько-частотними радіотелескопами. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2023. Т. 28. № 2. С. 117–129. <https://doi.org/10.15407/rpra28.02.117>
Citation: Dorovsky, V.V., Melnik, V.M., and Brazhenko, A.I., 2023. Ground based support of the space mission *Parker* performed with Ukrainian low frequency radio telescopes. *Radio Physics and Radio Astronomy*, **28**(2), pp. 117–129. <https://doi.org/10.15407/rpra28.02.117>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2023. Статтю опубліковано відповідно до умов відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

© Publisher PH "Akademperiodyka" of the NAS of Ukraine, 2023. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Вступ

Наземна підтримка є невід'ємною складовою будь-яких космічних місій, що виконують дистанційні дослідження космічних об'єктів у радіо-й оптичному діапазонах. Ця підтримка полягає в основному в спостереженні одних і тих самих явищ у спільних діапазонах довжин хвиль та порівнянні даних, отриманих космічними апаратами з даними наземних радіотелескопів, які вочевидь мають значно кращі чутливість, динамічний діапазон, часову, частотну та кутову роздільні здатності.

Окрім суто технічних переваг, спільні наземно-космічні спостереження можуть сприяти прогресу й у вирішенні багатьох астрофізичних задач завдяки тому, що одночасна смуга частот, у якій ведеться реєстрація радіовипромінювання, може простягатись від десятків кілогерців до декількох гігагерців в залежності від складу радіотелескопів, задіяних у спільних спостереженнях. Зокрема, при дослідженнях Сонця такий надширокосмуговий аналіз може надати унікальну інформацію про властивості сонячної корони, пучків субрелятивістських електронів у безпрецедентно великому діапазоні геліоцентричних відстаней — від 1.3 до 50 радіусів Сонця одночасно.

Зазвичай космічні радіоприймачі працюють у частотній смузі від ~ 10 кГц до 14...16 МГц. З цієї точки зору технічні параметри українських радіотелескопів УТР-2, УРАН-2 і ГУРТ [1–3] ідеально підходять для наземної підтримки космічних місій, оскільки здатні працювати в найнижчому для наземних спостережень частотному діапазоні, обмеженому знизу частотою іоносферної обрізки (8...10 МГц), а зверху частотами 32 МГц (УТР-2, УРАН-2) і 70 МГц (ГУРТ), що забезпечує максимально досягну смугу частот, доступну для спільного наземно-космічного аналізу.

Підтримка космічних місій українськими радіотелескопами активно проводиться, починаючи з 2006 року, коли було запущено два ідентичні апарати місії STEREO (Solar Terrestrial Relations Observatory), обладнані зокрема й апаратурою реєстрації радіовипромінювання STEREO-WAVES [4]. Наземну підтримку модуля S-WAVES місії STEREO було заплановано ще на етапі проектування. Для цього окрім основних ширококуго-

вих свіп-аналізаторів спектра LFR (Low Frequency Receiver, смуга 2.5...160.0 кГц) та HFR (High Frequency Receiver, смуга 0.125...16.025 МГц) було передбачено також встановлення одночастотного вузькосмугового приймача FFR (Fixed Frequency Receiver), який було налаштовано на частоту 30.025 МГц. Установлення додаткового приймача було викликано відсутністю на той час в Європі та США наземних інструментів, здатних надійно реєструвати радіовипромінювання на частотах нижче 30 МГц. Дані цього приймача планувалося використовувати для ідентифікації окремих сплесків, зареєстрованих одночасно на Землі та у космосі, з подальшим уточненням характеристик бортової приймальної апаратури.

По суті приймач FFR отримував профілі сонячного радіовипромінювання. Практика ж показує, що через різноманітність морфології сонячних сплесків їхня ідентифікація лише за профілем на окремі частоти є вкрай обмеженою. Натомість, українські радіотелескопи дозволяли порівнювати дані основного ширококугового бортового приймача HFR з наземними даними на рівні динамічних спектрів, що значно підвищувало точність ідентифікації.

Основними напрямками підтримки місії STEREO були [5]: крос-калібрування космічних радіометрів за даними українських радіотелескопів у спільній смузі частот, допомога в детектуванні тонкоструктурних сплесків, використання наземних радіотелескопів як третьої точки при триангуляції сонячних сплесків, уточнення даних про місцезнаходження джерел випромінювання, отриманих супутниками STEREO за методом гоніополяриметрії [6] даними геліографа на базі УТР-2 [7], вивчення параметрів сонячного вітру на великих елонгаціях методом міжпланетних мерехтінь [5]. Широка спільна смуга частот дозволяла, по-перше, надійно ідентифікувати конкретний сплеск за даними різних інструментів, а по-друге, провести крос-калібрування приймача HFR на борту супутника в широкій спільній смузі частот, що є дуже важливим, маючи на увазі умови, в яких працює космічна апаратура. Начиним прикладом доцільності такої підтримки можуть бути результати аналізу гектометрово-декаметрового сплеску II типу, зареєстрованого модулями S-WAVES апаратів STEREO-A/B і радіотелескопами УТР-2 і УРАН-2 7 червня 2011 р. [8].

Основні складнощі при спільній обробці й аналізі даних радіоспостережень наземних радіотелескопів і космічних апаратів типу WIND і STEREO, окрім очевидної різниці в ефективній площі антен, а значить у чутливості, полягають у суттєвій різниці частотної та часової роздільних здатностей апаратури реєстрації.

Часову роздільну здатність спектроаналізаторів зазначених супутників обмежено пропускну здатністю каналу передачі даних з борту супутника на Землю та загальними обмеженнями енергоспоживання, і вона складає зазвичай близько 1 хвилини. Також значно обмеженою є частотна роздільна здатність. Це обмежує діапазон досліджуваних явищ лише сплесками II та IV типів, тривалість яких коливається від десятків хвилин до декількох годин. Найпоширеніші та найчисленніші сплески III типу та їхні різновиди (сплески IIIb типу, U-сплески тощо) у спільній смузі частот космічними спектроаналізаторами не розділялися.

Недостатня частотна роздільна здатність при досить повільному свіп-аналізі також обмежувала перелік сонячних сплесків, що можна дослідити. Перш за все це стосується тонкоструктурних сонячних сплесків, таких як сонячні спайки, страя (сплески IIIb типу), S-сплески тощо. Неодноточний, послідовний аналіз окремих частот у спектрі з періодом близько 1 хвилини суттєво спотворював отримувані динамічні спектри. Тому навіть за наявності спільних частотних смуг наземних і космічних інструментів можливості спільної обробки даних були суттєво обмеженими.

Ситуація змінилася після запуску 12 серпня 2018 р. космічного зонду NASA Parker Solar Probe (PSP), який обладнано сучасною, набагато ефективнішою апаратурою реєстрації. Тому наземна підтримка цих космічних місій набула ще більшої актуальності.

Розділ 1 цієї статті присвячено плануванню та власне проведенню спільних спостережуваних сесій за участю українських радіотелескопів і космічного апарата PSP. У розд. 2 обговорюються особливості обробки даних, отриманих з борту космічного апарата, а також їхнє співставлення з даними наземних інструментів. Наведено результати крос-калібрування космічного радіотелескопа за даними спостережень групи потужних сплесків III типу, отриманими на радіотелескопі УТР-2.

1. Планування спільних наземно-космічних спостережень

Як і попередні сонячні космічні місії, такі як WIND і STEREO, зонд PSP спрямовано як на дистанційне дослідження в радіо- й оптичному діапазонах, так і на *in-situ* аналіз параметрів корони, сонячного вітру та високоенергетичних частинок.

Загалом на борту зонда PSP функціонує 4 окремих наукових модулі, що виконують різні задачі з вивчення Сонця та навколосонячного середовища [9–12]. Зокрема, модуль FIELDS призначено для аналізу магнітних і електричних полів, а також електромагнітних хвиль у діапазоні частот 10.0 кГц...19.2 МГц, температури та густини корональної плазми [9]. З опису, наведеного в [9], видно, що об'єкти дослідження модуля FIELDS апарата PSP і українських радіотелескопів співпадають, а їхні дані отримуються у спільному діапазоні частот більш ніж 10 МГц завширшки.

На відміну від попередніх космічних апаратів з дослідження Сонця, які виводилися на кругові орбіти або навколо точки Лагранжа (SOHO, WIND), або на орбіту Землі навколо Сонця (STEREO) та характеризувалися сталою відстанню від Сонця, супутник PSP має еліптичну орбіту зі значною різницею між перигелієм і афелієм. Крім того, його орбіта не є постійною. Вона ступінчасто стискається за рахунок періодичних прольотів повз Венеру. Перигелій орбіти зменшується від майже 36 радіусів Сонця на початку місії до менш ніж 10 радіусів у кінці. Афелій при цьому зменшується приблизно від 0.9 до 0.7 астрономічної одиниці. Період обертання супутника навколо Сонця поступово скорочується від 5 місяців у 2018–2019 рр. до 3 місяців у 2024–2025 рр.

Характерною особливістю наукової складової місії PSP є те, що параметри спостережень Сонця змінюються в залежності від позиції супутника на орбіті по відношенню до Сонця. Зокрема, модуль FIELDS проводить спостереження з максимальним часовим розділенням 3 с лише протягом 12 діб відносно часу перигелію. У решті часу (3...5 місяців) роздільна здатність спостережень становить 56 с, що унеможливорює ефективний аналіз наземно-космічних даних у спільній смузі частот. Зважаючи на вищесказане, наземні спостереження українськими радіотелескопами до-

цільно проводити лише у інтервалі ± 6 днів від дати перигелію PSP.

Крім цього, при плануванні спільних спостережень треба брати до уваги і взаємне положення Сонця, Землі та PSP в момент проходження останнім перигелію, яке для кожного перигелію різне. Велику вісь еліпса орбіти PSP орієнтовано таким чином, що під час перигеліїв у лютому—березні Земля та PSP знаходяться по один бік від Сонця, тоді як перигелії наприкінці літа є завжди залітковими для спостерігача на Землі.

Дати усіх запланованих перигеліїв, відповідні параметри орбіти, та виконання наземної підтримки станом на початок 2023 р. наведено у табл. 1. Жирним шрифтом позначено перигелії, вже забезпечені наземною підтримкою з боку українських радіотелескопів. Слід зазначити, що зонд PSP було запущено в період глибокого мінімуму сонячної активності між 24-м та 25-м циклами активності з таким розрахунком, щоб найнижчі перигелії його орбіти припадали на максимум активності 25-го циклу, який очікується у 2024—2025 рр. Через це всі перші перигелії відзначалися вкрай низькою активністю Сонця з поодинокими та здебільшого слабкими за потоком сплесками, що ускладнювало пошук подій, придатних для спільного аналізу.

Перші випадки одночасного спостереження сонячних сплесків наземними та космічним інструментами відбулися 6 та 9 квітня 2019 р. під час перигелію № 2 і 5 червня 2020 р. під час перигелію № 5. Спільний аналіз цих подій за даними зонда PSP і радіотелескопів УРАН-2 та ГУРТ наведено у роботах [13] та [14] відповідно.

2. Результати спостережень за програмою наземної підтримки

2.1. Особливості даних модуля FIELDS супутника PSP

На відміну від усіх попередніх космічних радіотелескопів, приймальна частина яких будувалася на базі звичайних супергетеродинних приймачів з відносно повільним скануванням частоти, апаратуру реєстрації модуля FIELDS створено на основі програмованих логічних матриць (Field-Programmable Gate Array — FPGA), які дозволяють виконувати швидке перетворення Фур'є широкосмугового сигналу в реальному масштабі часу [9]. Це дозволило розширити робочу смугу радіоспостережень, а також суттєво підвищити роздільну здатність, перш за все за часом.

Проектна робоча смуга частотного аналізу PSP становить 10.0 кГц...19.2 МГц. При цьому коефіцієнт перекриття усього діапазону (відно-

Таблиця 1. Дати перигеліїв PSP і стан наземної підтримки на початок 2023 року

Перигелій		Відстань від Сонця, Rs	Перигелій		Відстань від Сонця, Rs
№	Дата		№	Дата	
1	5 листопада 2018 р. ²	35.6	14	11 грудня 2022 р.	13.2
2	4 квітня 2019 р. ^{2,3}	35.6	15	17 березня 2023 р.	13.2
3	1 вересня 2019 р. ^{1,2,3}	35.6	16	22 червня 2023 р.	13.2
4	29 січня 2020 р. ^{1,2,3}	27.9	17	27 вересня 2023 р.	11.4
5	7 червня 2020 р. ^{1,2,3}	27.9	18	29 грудня 2023 р.	11.4
6	27 вересня 2020 р. ^{1,2}	20,4	19	30 березня 2024 р.	11.4
7	17 січня 2021 р. ^{1,2}	20,4	20	30 червня 2024 р.	11.4
8	29 квітня 2021 р. ^{1,2,3}	15.9	21	30 вересня 2024 р.	11.4
9	9 серпня 2021 р. ^{1,2,3}	15.9	22	24 грудня 2024 р.	9.9
10	21 листопада 2021 р. ^{1,2,3}	13.2	23	22 березня 2025 р.	9.9
11	25 лютого 2022 р.	13.2	24	19 червня 2025 р.	9.9
12	1 червня 2022 р. ¹	13.2	25	15 вересня, 2025 р.	9.9
13	6 вересня 2022 р. ¹	13.2	26	12 грудня 2025 р.	9.9

Примітки. ¹ — проведено наземну підтримку радіотелескопом УРАН-2; ² — проведено наземну підтримку радіотелескопом УТР-2; ³ — проведено наземну підтримку радіотелескопом ГУРТ.

шення максимальної частоти діапазону до мінімальної) становить 1920, що суттєво ускладнює як отримання, так і одночасну обробку даних. Тому діапазон було поділено між двома приймачами — низькочастотним (Low Frequency Receiver — LFR) зі смугою 10.0 кГц...1.7 МГц (коефіцієнт перекриття смуги 170) і високочастотним (High Frequency Receiver — HFR), який працював у смузі 1.2 МГц...19.2 МГц (коефіцієнт перекриття 16). Для порівняння коефіцієнт перекриття радіотелескопів УТР-2 і УРАН-2 складає близько 3, а радіотелескопа ГУРТ — 7.

Крім того для досліджень з максимально високою роздільною здатністю за частотою в низькочастотному діапазоні в приймачі LFR модуля FIELDS передбачено режим спостережень High Resolution (висока роздільна здатність), у якому отримується 32-точковий спектр у частотній смузі завширшки 75 кГц. Це забезпечує частотну роздільну здатність близько 2 кГц, що навіть вище, ніж роздільна здатність спектрополяриметра DSPZ [15], встановленого на радіотелескопі УТР-2, яка дорівнює 4 кГц. Центральна частота цієї смуги обирається науковим керівництвом місії в межах діапазону LFR приймача в залежності від поточної наукової задачі.

Після приймання оригінальних необроблених даних із супутника PSP (рівень даних L0) проводиться їхня обробка та перетворення в зручний для використання науковою спільнотою формат (рівні L1, L2, L3). Дані рівня L2 — найближчі до оригінальних, що є у вільному доступі. Для відображення даних цього рівня було обрано розроблений NASA формат наукових даних sdf (Common Data Format). Дані рівня L2 виставляються на сайті NASA приблизно через 6 місяців після самих спостережень. При цьому дані приймачів LFR і HFR зберігаються в окремих файлах. Слід зазначити, що в спектрах, отриманих на борту супутника PSP, забезпечено приблизно однакову відносну частотну роздільну здатність в усьому частотному діапазоні, яка дорівнює 4–5%. Для цього частотні канали в спектрі розміщено не в лінійному, а в логарифмічному масштабі. Як наслідок, із 64 частотних каналів приймача HFR на спільну з наземними радіотелескопами смугу частот припадає лише 16. Вказані фактори викликають певні складнощі при співставленні даних PSP і УТР-2.

2.2. Приклади сонячних сплесків, одночасно зареєстрованих українськими наземними радіотелескопами та зондом PSP

Класичні пари сплесків ШІВ-ІІІ типу було зареєстровано 6 та 9 квітня 2019 р. радіотелескопами УРАН-2, ГУРТ і космічним зондом PSP [13]. За даними радіотелескопа УРАН-2 потік випромінювання цих сплесків на частоті 10 МГц складав 70 с.о.п. та 350 с.о.п. відповідно (1 сонячна одиниця потоку дорівнює 10000 Ян), що не дозволяє віднести ці сплески до класу потужних [16]. На час спостережень активна область NOAA 12378, яка скоріш за все відповідала за генерацію сплесків, знаходилась на геліодовготі 55°Е. Водночас ця активна область була практично залімбовою для апарата PSP. Незважаючи на те, що ці сплески було надійно зареєстровані космічним приймачем, таке розташування космічного апарата підвищувало ймовірність суттєвого впливу діаграми направленості джерела радіовипромінювання на результати крос-калібрування. Невеликий потік радіовипромінювання також збільшував вплив галактичного фону на результати крос-калібрування, особливо на найнижчих частотах спільного діапазону.

Унікальну з багатьох точок зору складну подію було зареєстровано 5 червня 2020 р. о 09:36 УТ українськими радіотелескопами та приймачами LFR і HFR зонда PSP. Подія складалася з групи потужних сплесків ІІІ типу (за даними УТР-2 потік сягав 10^5 с.о.п. на частоті 11 МГц), які співпадали на динамічному спектрі з висхідними гілками групи сонячних U-сплесків. Результати спільного аналізу цієї події за даними апарата PSP і спостережень на радіотелескопі ГУРТ було розглянуто у роботі [14]. На момент цих спостережень кутове рознесення між супутником PSP і Землею по відношенню до джерела випромінювання складало близько 150°. При цьому для космічного апарата джерело також було залімбовим [14]. Цей факт суттєво ускладнює проведення крос-калібрування, оскільки діаграма направленості джерела в такому широкому кутовому діапазоні є невідомою. Крім цього радіотелескоп ГУРТ проводив спостереження лише однією секцією антен з 5×5 диполів і в порівнянні з радіотелескопами УТР-2 і УРАН-2 мав значно меншу ефективну площу та кутову вибірковість, а отже

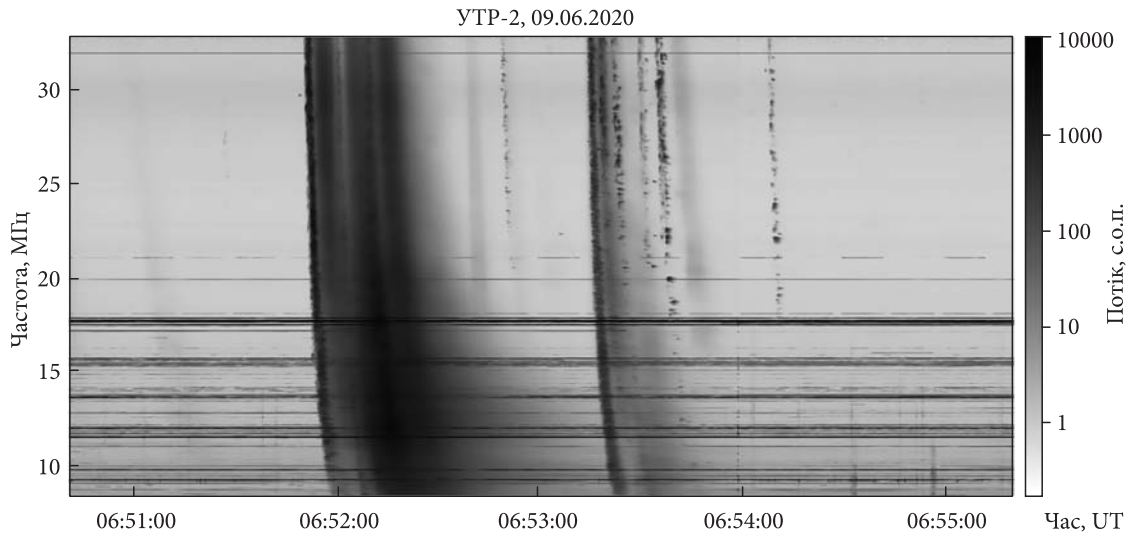


Рис. 1. Група сплесків ІІб і ІІІ типів (06:52 UT) та група сплесків ІІб типу (06:53 UT) за даними спостережень УТР-2 під час перигелію PSP № 5

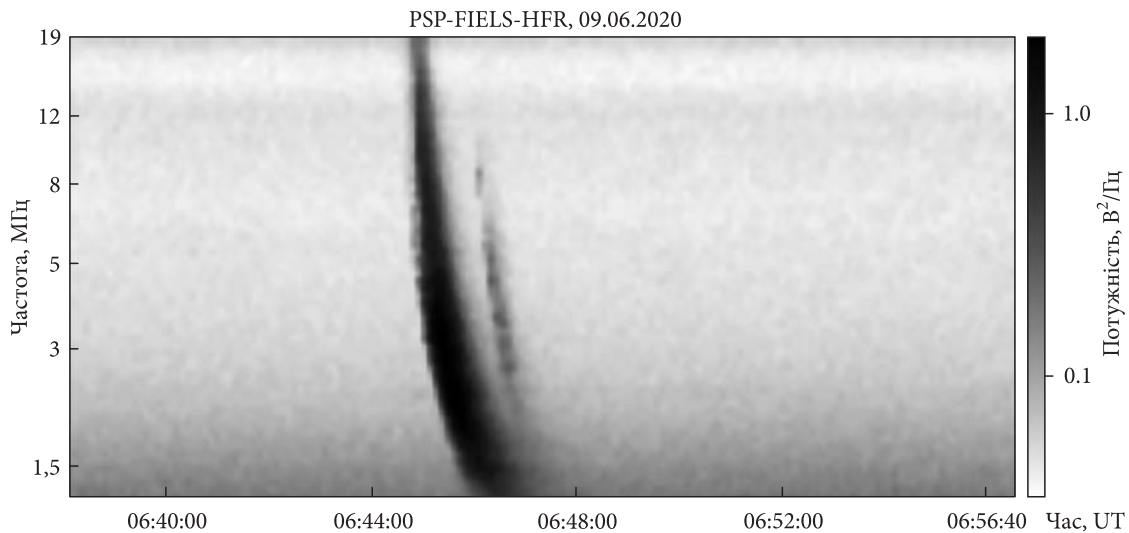


Рис. 2. Група сплесків ІІІ типу за даними апарата PSP

меншу чутливість і завадостійкість, особливо в спільній з PSP смузі 9...19 МГц. До того ж дані ГУРТ не є каліброваними, що взагалі унеможливує проведення крос-калібрування космічного апарата.

З точки зору саме наземної підтримки космічної місії PSP, більш доцільним бачиться використання українських радіотелескопів з великою ефективною площею, високою кутовою вибірковою, а тому більшою завадостійкістю, дані яких калібровано. Таким інструментом перш за все є радіотелескоп УТР-2. З іншого боку для мінімізації впливу діаграми направленості джерела на процес крос-калібрування необхідно вибирати

події, для яких кут між напрямками джерело—PSP та джерело—Земля є якомога менший. Вочевидь сплески 5 червня 2020 року такими не є.

Подію, яка більш відповідає вимогам якісної наземної підтримки, було зареєстровано радіотелескопом УТР-2 9 червня 2020 р. о 06:52 UT (на частоті 32 МГц). Вона являє собою потужну та щільну групу сплесків ІІб і ІІІ типів (рис. 1). Густина потоку окремих сплесків на частотах менше 12 МГц сягала більше 5 000 с.о.п. Тривалість цієї групи на частоті 30 МГц складала близько 30 с. Цю ж групу сплесків було зареєстровано приймачем FIELDS-HFR на борту апарата PSP о 06:45 UT (частота 19 МГц, рис. 2).

Через суттєву різницю у роздільній здатності тонка часова структура групи сплесків III типу розрізняється лише на записах радіотелескопа УТР-2.

Аналізуючи зображення, отримані супутником SDO (Solar Dynamic Observatory, рис. 3, б), можна припустити, що джерело випромінювання вказаних сплесків пов'язане з активною областю NOAA 12765, яка знаходилась майже на центральному меридіані. Тоді кут між напрямком від джерела на PSP і на Землю буде складати близько 60° (див. рис. 3, а), що є більш прийнятним для проведення крос-калібрування, ніж у випадку сплесків 6 та 9 квітня 2019 р. і 5 червня 2020 р.

З рис. 1 і 2 видно, що час реєстрації сплеску на Землі та на борту космічного апарату відрізняється. Це пояснюється тим, що під час перигелію космічний зонд знаходився суттєво ближче до джерела випромінювання, ніж наземні інструменти. Так, з рис. 3 можна визначити, що геліоцентрична відстань PSP складала 32 Rs (де Rs — радіус Сонця), в той час як Земля знаходилася на відстані у 219 Rs. Така різниця у відстанях відповідає затримці приходу сигналу на Землю по відношенню до PSP у 7 хв, що повністю співпадає з затримкою, отриманою з динамічних спектрів.

Співставлення даних УТР-2 і PSP з урахуванням часової затримки дозволяє отримати комбінований динамічний спектр у смузі частот від 32 МГц до 10 кГц. Такий спектр показано на рис. 4. Частоти нижче 0.5 МГц було обрізано, оскільки радіовипромінювання сплесків на цих частотах відсутнє.

На рис. 1 видно, що приблизно через півтори хвилини після групи сплесків III і IIIb типів спостерігається менш потужна група сплесків типу IIIb. Потік цих сплесків на частоті 15 МГц становить близько 100 с.о.п. Згідно з розрахунками, потік у місці розташування зонду PSP мав сягати 5000 с.о.п. і тому мав надійно реєструватися бортовим приймачем. Тим не менш ця група сплесків зовсім відсутня в даних PSP на частотах вище 9 МГц та усього на 4 дБ перевищує рівень галактичного фону на частоті 4 МГц.

Згідно з даними, отриманими на радіотелескопі УРАН-2, усі сплески IIIb типу є сильно поляризовані, зі ступенем кругової поляризації до 60 %. В той же час сплески III типу майже не

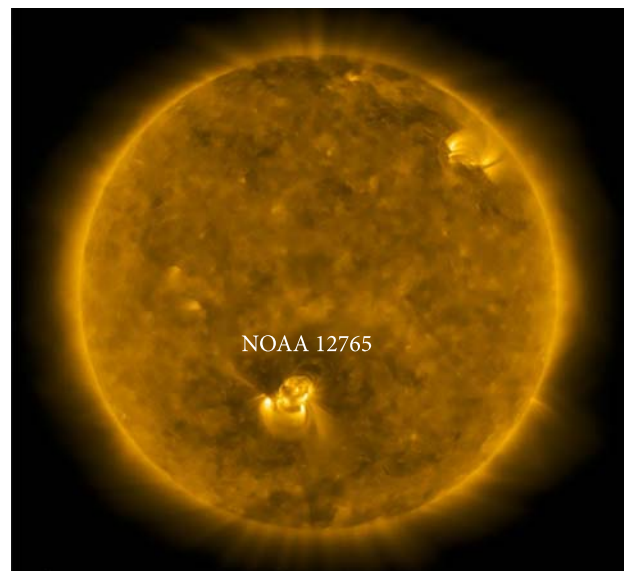
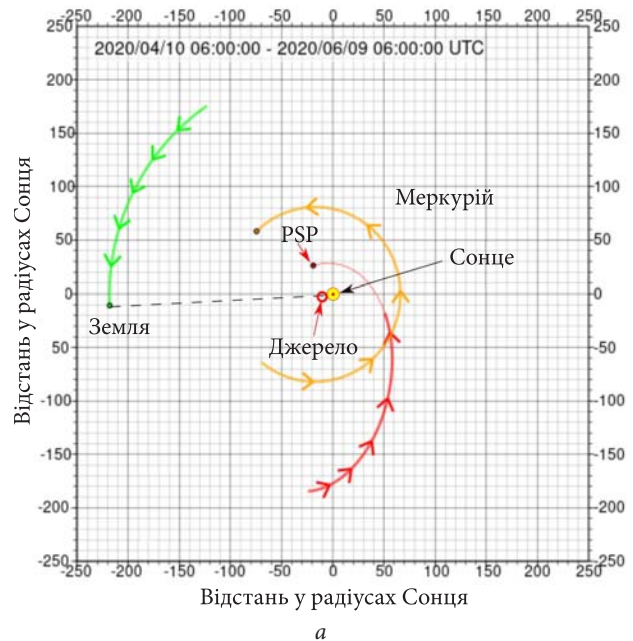


Рис. 3. Взаємне розташування Землі, супутника PSP і джерела випромінювання (а), а також положення активної області, відповідальної за випромінювання, за даними SDO (б) на момент спостережень 9 червня 2020 р.

поляризовані. Це може свідчити про те, що випромінювання сплесків IIIb типу відбувається на першій гармоніці локальної плазмової частоти, а сплески III типу являють собою випромінювання на другій гармоніці. Зважаючи на те, що апарат PSP знаходиться під кутом близько 60° до вірогідного напрямку поширення джерела аналізованих сплесків, можна припустити, що в нашому випадку космічний зонд реєструє переважно

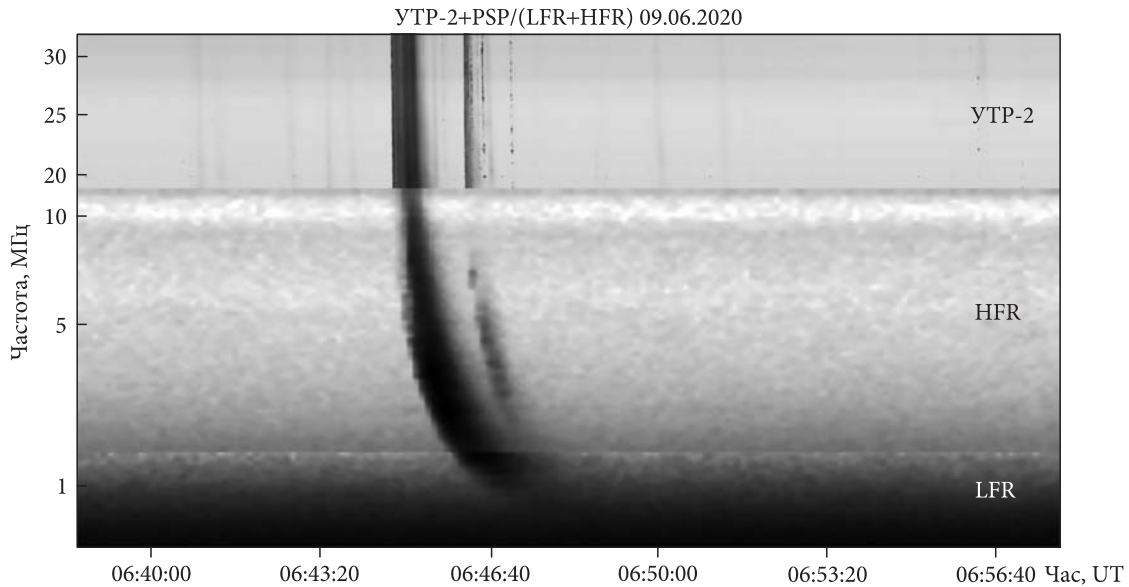


Рис. 4. Комбінований динамічний спектр аналізованих сплесків за даними радіотелескопа УТР-2 і приймачів HFR та LFR модуля FIELDS зонда PSP

сплески III типу, джерело яких має суттєво ширшу діаграму направленості, аніж у випадку сплесків типу IIIb.

2.3. Результати крос-калібрування приймача PSP-FIELDS-HFR за даними спостережень радіотелескопа УТР-2

Визначенню спектральної густини потоку радіовипромінювання, прийнятого бортовими радіометрами космічних апаратів, завжди приділялася особлива увага, оскільки цей параметр є важливим для визначення механізму генерації цього випромінювання. Основна задача калібрування приймальної апаратури супутників полягає в обчисленні величини потоку в одиницях $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \text{Гц}^{-1}$ за величиною спектральної густини потужності в одиницях $\text{В}^2 \cdot \text{Гц}^{-1}$, що отримується бортовими аналізаторами спектра. У роботі [17] показано, що цей потік може бути обчислено як

$$S(f) = C(f) \times P(f) / A_{\text{eff}}(f), \quad (1)$$

де $S(f)$ — спектральна густина потоку у точці прийому; $C(f)$ — коефіцієнт пропорційності; $P(f)$ — спектральна густина потужності, що вимірюється бортовим спектроаналізатором супутника; $A_{\text{eff}}(f)$ — ефективна площа антени космічного приймача. Усі величини, що входять до рівняння (1), у загальному випадку є частото-залежними.

Діапазон довжин хвиль, у яких працює приймач HFR зонда PSP, складає від 15 до 250 м. В той же час антеною приймача є диполь з лінійним розміром 4 м. Тобто на усіх частотах антена являє собою короткий диполь (довжина диполя менше половини довжини хвилі). Для короткого диполя ефективна площа не залежить від лінійного розміру самого диполя, а визначається лише довжиною хвилі радіовипромінювання [17]

$$A_{\text{eff}} = \frac{\lambda^2}{4\pi} G, \quad (2)$$

де λ — довжина хвилі радіовипромінювання, м; G — коефіцієнт підсилення антени, який для короткого диполя становить 1.5.

У роботі [17] для калібрування даних приймача RAD2 супутника WIND використовувалось випромінювання галактичного фону. В даній роботі для калібрування даних апарата PSP пропонується використовувати набагато інтенсивніше спорадичне радіовипромінювання Сонця. При калібруванні потужним сигналом сонячного сплеску впливом власного шуму приймача та фоновим випромінюванням можна знехтувати.

Як вже зазначалося раніше, для крос-калібрування приймача HFR апарата PSP було обрано групу сплесків III типу, зареєстрованих 9 червня 2020 р. При цьому у рівнянні (1) величина $S(f)$ — це потік цих сплесків у місці розташуван-

ня космічного апарату PSP, яку необхідно знайти, величина $P(f)$ — це спектральна густина потужності сплесків, зареєстрована на вході приймача HFR. Саме ця величина міститься у даних, що передаються на Землю. У той же час ми маємо потік випромінювання цих самих сплесків, вимірний радіотелескопом УТР-2 на поверхні Землі ($S_{\text{УТР}}$). Оскільки густина потоку зворотно пропорційна квадрату відстані від джерела, можна отримати величину потоку в місці розташування супутника по величині потоку на рівні Землі, знаючи їхні геліоцентричні відстані. Можна записати, що

$$S(f) = S_{\text{УТР}} \left(\frac{R_3}{R_{\text{PSP}}} \right)^2 = S_{\text{УТР}} K_D^2, \quad (3)$$

де R_3 та R_{PSP} — геліоцентричні відстані Землі та зонда PSP відповідно, а K_D — відношення цих відстаней. Об'єднуючи рівняння (1)–(3) для коефіцієнта пропорційності, можна записати

$$C(f) = \frac{1.5 S_{\text{УТР}} K_D^2 \lambda^2}{4\pi P(f)}. \quad (4)$$

Отже, знаючи відстані Землі та космічного зонда від Сонця на момент спостережень, вимірний радіотелескопом УТР-2 потік і вимірну на борту супутника спектральну густина потужності, можна обчислити коефіцієнт пропорційності $C(f)$ у рівнянні (1) в усій спільній смузі частот 8...19 МГц.

Обчислені з рівняння (4) значення коефіцієнта пропорційності $C(f)$, а також відповідних потоків $S(f)$ і $S_{\text{УТР}}(f)$ та спектральної густини потужності $P(f)$ наведено в табл. 2.

З табл. 2 видно, що значення коефіцієнта $C(f)$ на крайніх частотах спільного діапазону суттєво

(у 1.5...2 рази) відрізняються від решти значень. Для частоти 9 МГц зниження значення коефіцієнта $C(f)$ може бути пов'язане із заниженням вимірюного потоку радіовипромінювання відносно реального через поглинання в іоносфері Землі. Сплеск спостерігався за 3 години до кульмінації Сонця, через що промінь діаграми направленості радіотелескопа перетинав іоносферний шар під значним кутом, що збільшувало його товщину.

Частота 19 МГц є граничною для приймача HFR, тому не можна виключати граничні ефекти в ланцюгах узгодження антени та фільтрації в підсилювачі. Крім цього не слід випускати з уваги вплив діаграми направленості джерела, оскільки Земля, PSP і джерело все ж таки не знаходилися на одній прямій.

Дані аналізу не показують суттєвої систематичної залежності коефіцієнта $C(f)$ від частоти. Так, при зростанні частоти на 50 % варіації коефіцієнта $C(f)$ складають усього 16 % і мають скоріш випадковий характер. Виходячи з того, що крос-калібрування в даній роботі проведено на основі усього одного спостереження та у відносно вузькій смузі частот (11...17 МГц), автори вважають доцільним ввести оціночний коефіцієнт, що не залежить від частоти, але має певну точність визначення, а саме $C(f) = 1.72 \pm 0.14 \text{ Ом}^{-1}$.

В підсумку за виключенням двох граничних частот можна записати

$$S(f) = \frac{(1.72 \pm 0.14) 4\pi P(f)}{1.5 \lambda^2}. \quad (5)$$

Отриманий у роботі коефіцієнт пропорційності безумовно є оціночним, оскільки його отримано на основі спільного спостереження лише одного сплеску. Через доволі вузьку спільну смугу частот і обмежену кількість частотних каналів модуля FIELDS у цій смузі для отримання надійної залежності коефіцієнта $C(f)$ від частоти необхідна суттєво більша статистика спостережень. Збільшення статистичної вибірки спільних вимірювань також сприятиме мінімізації впливу земної іоносфери та діаграми направленості джерела випромінювання на результати крос-калібрування. За умов серйозного пошкодження радіотелескопа УТР-2 таку статистику цілком можливо отримати упродовж наступних пери-

Таблиця 2. Результати крос-калібрування приймача FIELDS-HFR зонда PSP за даними спостережень радіотелескопа УТР-2

Частота, МГц	$P, \times 10^{-15} \text{ В}^2 \cdot \text{Гц}^{-1}$	$C, \text{ Ом}^{-1}$	$S_{\text{УТР}}, \text{ с.о.п.}$	$S, \text{ с.о.п.}$
9	0.67	1.02	1117	51 762
11	0.55	1.97	2633	122 000
13	0.46	1.62	2532	117 330
15	0.29	1.89	2485	115 150
17	0.22	1.6	2020	93 790
19	0.18	1.24	1626	75 370

геліїв PSP (див. табл. 1) за допомогою другого за розмірами українського радіотелескопа УРАН-2.

Висновки

У роботі розглянуто питання наземної підтримки космічної місії Parker Solar Probe за допомогою великих українських радіотелескопів декаметрового діапазону. Показано, що параметри радіотелескопів УТР-2 і УРАН-2 є ідеальними для спільних з PSP спостережень у діапазоні частот 8...19 МГц. Розглянуто особливості спостережень космічного зонда, специфіку отримуваних з нього даних і обґрунтовано методику планування спільних спостережень та особливості спільного аналізу даних. Наведено приклади од-

ночасної реєстрації тих самих подій наземним і космічним інструментами. На конкретному прикладі продемонстровано алгоритм крос-калібрування зонда PSP за даними радіотелескопа УТР-2. Отримано рівняння (5) для обчислення потоку за даними PSP. Розглянуто чинники, що можуть призводити до похибок у крос-калібруванні, та способи їхнього усунення. Показано доцільність подальшої наземної підтримки місії PSP українськими радіотелескопами.

Робота фінансувалася в рамках держбюджетних НДР «Радіус» (0122U000616) і «Кронос» (0122U002460). Автори вдячні науковій групі місії Parker Solar Probe за можливість вільного використання отриманих у ході місії даних.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Brazhenko A., Vashchishin R., Pylaev O., Koshovyy V., Lozinsky A., Ivantyshin O., Rucker H.O., Panchenko M., Fischer G., Lecacheux A., Denis L., Coffre A., Griebmeier J.-M., Tagger M., Girard J., Charrier D., Briand C. & Mann G. The modern radio astronomy network in Ukraine: UTR-2, URAN and GURT. *Exp. Astron.* 2016. Vol. 42, Iss. 1. P. 11–48. DOI: 10.1007/s10686-016-9498-x
2. Коноваленко А.А., Ерин С.Н., Бубнов И.Н., Токарский П.Л., Захаренко В.В., Ульянов О.М., Сидорчук М.А., Степкин С.В., Гридин А.А., Квасов Г.В., Колядин В.Л., Мельник В.Н., Доровский В.В., Калиниченко Н.Н., Литвиненко Г.В., Зарка Ф., Дени Л., Жирар Ж., Рукер Х.О., Панченко М., Станиславский А.А., Христенко А.Д., Муха Д.В., Резниченко А.М., Лисаченко В.М., Борцов В.В., Браженко А.И., Васильева Я.Ю., Скорик А.А., Шевцова А.И., Милостная К.Ю. *Астрофизические исследования с помощью малоразмерных низкочастотных радиотелескопов нового поколения. Радиофизика и радиоастрономия.* 2016. Т. 21, № 2. С. 83–131.
3. Konovalenko A., Zarka P., Rucker H.O., Zakharenko V., Ulyanov O., Sidorchuk M., Stepkin S., Melnik V., Kalinichenko N., Stanislavsky A., Tokarsky P., Koliadin V., Shepelev V., Dorovskyy V., Bubnov I., Yerin S., Reznichenko A., Litvinenko G., Shevchuk N., Koval A., Vasylieva I., Mylostna K., Skoryk A., Shevtsova A., Volvach Y., Vasylykovsky E., Ryabov V., Lecacheux A., Denis L., Panchenko M., Fischer G., Imai M., Griessmeier J.-M., Mann G., Litvinenko O., Brazhenko A., Vashchishin R., Frantsuzenko A., Koshovyy V., Lozinsky A., Ivantyshin O. Multi-antenna observations in the low-frequency radio astronomy of solar system objects and related topics studies. G. Fischer, G. Mann, M. Panchenko, and P. Zarka, eds. *Planetary Radio Emissions VIII*. Proc. 8th Int. Workshop on Planetary, Solar and Heliospheric Radio Emissions held at Seggau near Graz, Austria, 25–27 Oct. 2016. Vienna: Austrian Academy of Sciences Press, 2017. P. 467–478. DOI: 10.1553/PRE8s467
4. Bougeret J.L., Goetz K., Kaiser M.L., Bale S.D., Kellogg P.J., Maksimovic M., Monge N., Monson S.J., Astier P.L., Davy S., Dekkali M., Hinze J.J., Manning R.E., Aguilar-Rodriguez E., Bonnin X., Briand C., Cairns I.H., Cattell C.A., Cecconi B., Eastwood J., Ergun R.E., Fainberg J., Hoang S., Huttunen K.E.J., Krucker S., Lecacheux A., MacDowall R.J., Macher W., Mangeney A., Meetre C.A., Moussas X., Nguyen Q.N., Oswald T.H., Pulupa M., Reiner M.J., Robinson P.A., Rucker H., Salem C., Santolik O., Silvis J.M., Ullrich R., Zarka P. & Zouganelis I. S/WAVES: The Radio and Plasma Wave Investigation on the STEREO Mission. *Space Sci. Rev.* 2008. Vol. 136, Iss. 1–4. P. 487–528. DOI: 10.1007/s11214-007-9298-8
5. Konovalenko A.A., Stanislavsky A.A., Rucker H.O., Lecacheux A., Mann G., Bougeret J.L., Kaiser M.L., Briand C., Zarka P., Abranin E.P., Dorovsky V.V., Koval A.A., Mel'nik V.N., Mukha D.V., Panchenko M. Synchronized observations by using the STEREO and the largest ground-based decametre radio telescope. *Exp. Astron.* 2013. Vol. 36, Iss. 1–2. P. 137–154.
6. Cecconi B., Bonnin X., Hoang S., Maksimovic M., Bale S.D., Bougeret J.-L., Goetz K., Lecacheux A., Reiner M.J., Rucker H.O., Zarka P. STEREO/Waves Goniopolarimetry. *Space Sci. Rev.* 2008. Vol. 136. P. 549–563. DOI 10.1007/s11214-007-9255-6
7. Абрагин Э.П., Станиславский А.А., Коваль А.А., Коноваленко А.А. Гелиограф радиотелескопа УТР-2. II. Конструктивные особенности. *Радиофизика и радиоастрономия.* 2011. Т. 16, № 2. С. 135–144.
8. Dorovskyy V.V., Melnik V.N., Konovalenko A.A., Brazhenko A.I., Panchenko M., Poedts S., Mykhaylov V.A. Fine and Superfine Structure of the Decameter-Hectometer Type II Burst on 7 June 2011. *Sol. Phys.* 2015. Vol. 290, Iss. 7. P. 2031–2042.
9. Bale S.D., Goetz K., Harvey P.R., Turin P., Bonnelli J.W., Dudok de Wit T., Ergun R.E., MacDowall R.J., Pulupa M., Andre M., Bolton M., Bougeret J.L., Bowen T.A., Burgess D., Cattell C.A., Chandran B.D.G., Chaston C.C., Chen C.H.K., Choi M.K., Connerney J.E., Cranmer S., Diaz-Aguado M., Donakowski W., Drake J.F., Farrell W.M., Ferreau P., Fermin J., Fischer J., Fox N., Glaser D., Goldstein M., Gordon D., Hanson E., Harris S.E., Hayes L.M., Hinze J.J., Hollweg J.V., Horbury T.S., Howard R.A., Hoxie V., Jannet G., Karlsson M., Kasper J.C., Kellogg P.J., Kien M., Klimchuk J.A., Krasnoselskikh V.V., Krucker S., Lynch J.J.,

- Maksimovic M., Malaspina D.M., Marker S., Martin P., Martinez-Oliveros J., McCauley J., McComas D.J., McDonald T., Meyer-Vernet N., Moncuquet M., Munson S.J., Mozer F.S., Murphy S.D., Odom J., Oliverson R., Olson J., Parker E.N., Pankow D., Phan T., Quataert E., Quinn T., Ruplin S.W., Salem C., Seitz D., Sheppard D.A., Siy A., Stevens K., Summers D., Szabo A., Timofeeva M., Vaivads A., Velli M., Yehle A., Werthimer D., Wygant J.R. The FIELDS Instrument Suite for Solar Probe Plus. Measuring the Coronal Plasma and Magnetic Field, Plasma Waves and Turbulence, and Radio Signatures of Solar Transients. *Space Sci. Rev.* 2016. Vol. 204, Iss 1–4. P. 49–82.
10. Kasper J.C., Abiad R., Austin G., Balat-Pichelin M., Bale S.D., Belcher J.W., Berg P., Bergner H., Berthomier M., Bookbinder J., Brodu E., Caldwell D., Case A.W., Chandran B.D.G., Cheimets P., Cirtain J.W., Cranmer S.R., Curtis D.W., Daigneau P., Dalton G., Dasgupta B., DeTomaso D., Diaz-Aguado M., Djordjevic B., Donaskowski B., Effinger M., Florinski V., Fox N., Freeman M., Gallagher D., Gary S.P., Gauron T., Gates R., Goldstein M., Golub L., Gordon D.A., Gurnee R., Guth G., Halekas J., Hatch K., Heerikuisen J., Ho G., Hu Q., Johnson G., Jordan S.P., Korreck K.E., Larson D., Lazarus A.J., Li G., Livi R., Ludlam M., Maksimovic M., McFadden J.P., Marchant W., Maruca B.A., McComas D.J., Messina L., Mercer T., Park S., Peddie A.M., Pogorelov N., Reinhart M.J., Richardson J.D., Robinson M., Rosen I., Skoug R.M., Slagle A., Steinberg J.T., Stevens M.L., Szabo A., Taylor E.R., Tiu C., Turin P., Velli M., Webb G., Whittlesey P., Wright K., Wu S.T. & Zank G. Solar Wind Electrons Alphas and Protons (SWEAP) Investigation: Design of the Solar Wind and Coronal Plasma Instrument Suite for Solar Probe Plus. *Space Sci. Rev.* 2016. Vol. 204, Iss. 1–4. P. 131–186.
 11. Vourlidas A., Howard R.A., Plunkett S.P., Korendyke C.M., Thernisien A.F.R., Wang D., Rich N., Carter M.T., Chua D.H., Socker D.G., Linton M.G., Morrill J.S., Lynch S., Thurn A., Van Duijne P., Hagood R., Clifford G., Grey P.J., Velli M., Liewer P.C., Hall J.R., DeJong E.M., Mikic Z., Rochus P., Mazy E., Bothmer V. & Rodmann J. The Wide-Field Imager for Solar Probe Plus (WISPR). *Space Sci. Rev.* 2016. Vol. 204, Iss. 1–4. P. 83–130.
 12. McComas D.J., Alexander N., Angold N., Bale S., Beebe C., Birdwell B., Boyle M., Burgum J.M., Burnham J.A., Christian E.R., Cook W.R., Cooper S.A., Cummings A.C., Davis A.J., Desai M.I., Dickinson J., Dirks G., Do D.H., Fox N., Giacalone J., Gold R.E., Gurnee R.S., Hayes J.R., Hill M.E., Kasper J.C., Kecman B., Klemic J., Krimigis S.M., Labrador A.W., Layman R.S., Leske R.A., Livi S., Matthaeus W.H., McNutt R.L., Mewaldt R.A., Mitchell D.G., Nelson K.S., Parker C., Rankin J.S., Roelof E.C., Schwadron N.A., Seifert H., Shuman S., Stokes M.R., Stone E.C., Vandegriff J.D., Velli M., von Roseninge T.T., Weidner S.E., Wiedenbeck M.E., Wilson P. Integrated Science Investigation of the Sun (ISIS): Design of the Energetic Particle Investigation. *Space Sci. Rev.* 2016. Vol. 204, Iss. 1–4. P. 187–256.
 13. Melnik V.N., Brazhenko A.I., Konovalenko A.A., Frantsuzenko A.V., Yerin S.M., Dorovskyy V.V., Bubnov I.M. Properties of Type III and Type IIIb Bursts in the Frequency Band of 8–80 MHz During PSP Perihelion at the Beginning of April 2019. *Sol. Phys.* 2021. Vol. 296, Iss. 1, id. 9.
 14. Stanislavsky A.A., Bubnov I.N., Koval A.A., Yerin S.N. Parker Solar Probe detects solar radio bursts related with a behind-the-limb active region. *Astron. Astrophys.* 2022. Vol. 657, id. A21, 10 pp.
 15. 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, id. 1641010-738. DOI: 10.1142/S2251171716410105
 16. Melnik V.N., Konovalenko A.A., Rucker H.O., Boiko A.I., Dorovsky V.V., Abranin E.P., Lecacheux A. Observations of Powerful Type III Bursts in the Frequency Range 10–30 MHz. *Sol. Phys.* 2011. Vol. 269, Iss. 2. P. 335–350.
 17. Dulk G.A., Erickson W.C., Manning R., Bougeret J.-L. Calibration of low-frequency radio telescopes using the galactic background radiation. *Astron. Astrophys.* 2001. Vol. 365. P. 294–300.

Стаття надійшла 02.03.2023

REFERENCES

1. Brazhenko, A., Vashchishin, R., Pylaev, O., Koshovyy, V., Lozinsky, A., Ivantyshin, O., Rucker, H.O., Panchenko, M., Fischer, G., Lecacheux, A., Denis, L., Coffre, A., Griefsmeier, J.-M., Tagger, M., Girard, J., Charrier, D., Briand, C. & Mann, G., 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
2. 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 Studies with Small Low-Frequency Radio Telescopes of New Generation. *Radio Phys. Radio Astron.*, **21**(2), pp. 83–131 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra21.02.083>
3. Konovalenko, A., Zarka, P., Rucker, H.O., Zakharenko, V., Ulyanov, O., Sidorchuk, M., Stepkin, S., Melnik, V., Kalinichenko, N., Stanislavsky, A., Tokarsky, P., Koliadin, V., Shepelev, V., Dorovskyy, V., Bubnov, I., Yerin, S., Reznichenko, A., Litvinenko, G., Shevchuk, N., Koval, A., Vasylieva, I., Mylostna, K., Skoryk, A., Shevtsova, A., Volvach, Y., Vasylykovsky, E., Ryabov, V., Lecacheux, A., Denis, L., Panchenko, M., Fischer, G., Imai, M., Griessmeier, J.-M., Mann, G., Litvinenko, O., Brazhenko, A., Vashchishin,

- R., Frantsuzenko, A., Koshovy, V., Lozinsky, A., Ivantyshin, O., 2016 Multi-antenna observations in the low-frequency radio astronomy of solar system objects and related topics studies. In: G. Fischer, G. Mann, M. Panchenko, and P. Zarka, eds. *Planetary Radio Emissions VIII*. Proc. 8th Int. Workshop on Planetary, Solar and Heliospheric Radio Emissions held at Seggau near Graz, Austria, 25–27 Oct. 2016. Vienna: Austrian Academy of Sciences Press, pp. 467–478. DOI: 10.1553/PRE8s467
4. Bougeret, J.L., Goetz, K., Kaiser, M.L., Bale, S.D., Kellogg, P.J., Maksimovic, M., Monge, N., Monson, S.J., Astier, P.L., Davy, S., Dekkali, M., Hinze, J.J., Manning, R.E., Aguilar-Rodriguez, E., Bonnin, X., Briand, C., Cairns, I.H., Cattell, C.A., Cecconi, B., Eastwood, J., Ergun, R.E., Fainberg, J., Hoang, S., Huttunen, K.E.J., Krucker, S., Lecacheux, A., MacDowall, R.J., Mache, W., Mangeney, A., Meetre, C.A., Moussas, X., Nguyen, Q.N., Oswald, T.H., Pulupa, M., Reiner, M.J., Robinson, P.A., Rucker, H., Salem, C., Santolik, O., Silvis, J.M., Ullrich, R., Zarka, P. & Zouganelis, I., 2008. S/WAVES: The Radio and Plasma Wave Investigation on the STEREO Mission. *Space Sci. Rev.*, **136**(1–4), pp. 487–528. DOI: 10.1007/s11214-007-9298-8
 5. Konovalenko, A.A., Stanislavsky, A.A., Rucker, H.O., Lecacheux, A., Mann, G., Bougeret, J.L., Kaiser, M.L., Briand, C., Zarka, P., Abranin, E.P., Dorovsky, V.V., Koval, A.A., Mel'nik, V.N., Mukha, D.V., Panchenko, M., 2013. Synchronized observations by using the STEREO and the largest ground-based decametre radio telescope. *Exp. Astron.*, **36**(1–2), pp. 137–154.
 6. Cecconi, B., Bonnin, X., Hoang, S., Maksimovic, M., Bale, S.D., Bougeret, J.-L., Goetz, K., Lecacheux, A., Reiner, M.J., Rucker, H.O., Zarka, P., 2008. STEREO/Waves Goniopolarimetry. *Space Sci. Rev.*, **136**, pp. 549–563. DOI 10.1007/s11214-007-9255-6
 7. Abranin, E.P., Stanislavsky, A.A., Koval, A.A., Konovalenko, A.A., 2011. Heliograph of the UTR-2 Radio Telescope. II. Design Features. *Radio Phys. Radio Astron.*, **2**(4), pp. 299–305. DOI: 10.1615/RadioPhysicsRadioAstronomy.v2.i4.20
 8. Dorovsky, V.V., Melnik, V.N., Konovalenko, A.A., Brazhenko, A.I., Panchenko, M., Poedts, S., Mykhaylov, V.A., 2015. Fine and Superfine Structure of the Decameter-Hectometer Type II Burst on 7 June 2011. *Sol. Phys.*, **290**(7), pp. 2031–2042.
 9. Bale, S.D., Goetz, K., Harvey, P.R., Turin, P., Bonnell, J.W., Dudok de Wit, T., Ergun, R.E., MacDowall, R.J., Pulupa, M., Andre, M., Bolton, M., Bougeret, J.L., Bowen, T.A., Burgess, D., Cattell, C.A., Chandran, B.D.G., Chaston, C.C., Chen, C.H.K., Choi, M.K., Connerney, J.E., Cranmer, S., Diaz-Aguado, M., Donakowski, W., Drake, J.F., Farrell, W.M., Fergeau, P., Fermin, J., Fischer, J., Fox, N., Glaser, D., Goldstein, M., Gordon, D., Hanson, E., Harris, S.E., Hayes, L.M., Hinze, J.J., Hollweg, J.V., Horbury, T.S., Howard, R.A., Hoxie, V., Jannet, G., Karlsson, M., Kasper, J.C., Kellogg, P.J., Kien, M., Klimchuk, J.A., Krasnoselskikh, V.V., Krucker, S., Lynch, J.J., Maksimovic, M., Malaspina, D.M., Marker, S., Martin, P., Martinez-Oliveros, J., McCauley, J., McComas, D.J., McDonald, T., Meyer-Vernet, N., Moncuquet, M., Monson, S.J., Mozer, F.S., Murphy, S.D., Odom, J., Oliverson, R., Olson, J., Parker, E.N., Pankow, D., Phan, T., Quataert, E., Quinn, T., Ruplin, S.W., Salem, C., Seitz, D., Sheppard, D.A., Siy, A., Stevens, K., Summers, D., Szabo, A., Timofeeva, M., Vaivads, A., Velli, M., Yehle, A., Werthimer, D., Wygant, J.R., 2016. The FIELDS Instrument Suite for Solar Probe Plus. Measuring the Coronal Plasma and Magnetic Field, Plasma Waves and Turbulence, and Radio Signatures of Solar Transients. *Space Sci. Rev.*, **204**(1–4), pp. 49–82.
 10. Kasper, J.C., Abiad, R., Austin, G., Balat-Pichelin, M., Bale, S.D., Belcher, J.W., Berg, P., Bergner, H., Berthomier, M., Bookbinder, J., Brodu, E., Caldwell, D., Case, A.W., Chandran, B.D.G., Cheimets, P., Cirtain, J.W., Cranmer, S.R., Curtis, D.W., Daigneau, P., Dalton, G., Dasgupta, B., DeTomaso, D., Diaz-Aguado, M., Djordjevic, B., Donakowski, B., Effinger, M., Florinski, V., Fox, N., Freeman, M., Gallagher, D., Gary, S.P., Gauron, T., Gates, R., Goldstein, M., Golub, L., Gordon, D.A., Gurnee, R., Guth, G., Halekas, J., Hatch, K., Heerikuisen, J., Ho, G., Hu, Q., Johnson, G., Jordan, S.P., Korreck, K.E., Larson, D., Lazarus, A.J., Li, G., Livi, R., Ludlam, M., Maksimovic, M., McFadden, J.P., Marchant, W., Maruca, B.A., McComas, D.J., Messina, L., Mercer, T., Park, S., Peddie, A.M., Pogorelov, N., Reinhart, M.J., Richardson, J.D., Robinson, M., Rosen, I., Skoug, R.M., Slagle, A., Steinberg, J.T., Stevens, M.L., Szabo, A., Taylor, E.R., Tiu, C., Turin, P., Velli, M., Webb, G., Whittlesey, P., Wright, K., Wu, S.T. & Zank, G., 2016. Solar Wind Electrons Alphas and Protons (SWEAP) Investigation: Design of the Solar Wind and Coronal Plasma Instrument Suite for Solar Probe Plus. *Space Sci. Rev.*, **204**(1–4), pp. 131–186.
 11. Vourlidis, A., Howard, R.A., Plunkett, S.P., Korendyke, C.M., Thernisien, A.F.R., Wang, D., Rich, N., Carter, M.T., Chua, D.H., Socker, D.G., Linton, M.G., Morrill, J.S., Lynch, S., Thurn, A., Van Duijne, P., Hagood, R., Clifford, G., Grey, P.J., Velli, M., Liewer, P.C., Hall, J.R., DeJong, E.M., Mikic, Z., Rochus, P., Mazy, E., Bothmer, V. & Rodmann, J., 2016. The Wide-Field Imager for Solar Probe Plus (WISPR). *Space Sci. Rev.*, **204**(1–4), pp. 83–130.
 12. McComas, D.J., Alexander, N., Angold, N., Bale, S., Beebe, C., Birdwell, B., Boyle, M., Burgum, J.M., Burnham, J.A., Christian, E.R., Cook, W.R., Cooper, S.A., Cummings, A.C., Davis, A.J., Desai, M.I., Dickinson, J., Dirks, G., Do, D.H., Fox, N., Giacalone, J., Gold, R.E., Gurnee, R.S., Hayes, J.R., Hill, M.E., Kasper, J.C., Kecman, B., Klemic, J., Krimigis, S.M., Labrador, A.W., Layman, R.S., Leske, R.A., Livi, S., Matthaeus, W.H., McNutt, R.L., Mewaldt, R.A., Mitchell, D.G., Nelson, K.S., Parker, C., Rankin, J.S., Roelof, E.C., Schwadron, N.A., Seifert, H., Shuman, S., Stokes, M.R., Stone, E.C., Vandegriff, J.D., Velli, M., von Roseninge, T.T., Weidner, S.E., Wiedenbeck, M.E., Wilson, P., 2016. Integrated Science Investigation of the Sun (ISIS): Design of the Energetic Particle Investigation. *Space Sci. Rev.*, **204**(1–4), pp. 187–256.
 13. Melnik, V.N., Brazhenko, A.I., Konovalenko, A.A., Frantsuzenko, A.V., Yerin, S.M., Dorovsky, V.V., Bubnov, I.M., 2021. Properties of Type III and Type IIIb Bursts in the Frequency Band of 8–80 MHz During PSP Perihelion at the Beginning of April 2019. *Sol. Phys.*, **296**(1), id. 9.
 14. Stanislavsky, A.A., Bubnov, I.N., Koval, A.A., Yerin, S.N., 2022. Parker Solar Probe detects solar radio bursts related with a behind-the-limb active region. *Astron. Astrophys.*, **657**, id. A21, 10 pp.
 15. Zakharenko, V., Konovalenko, A., Zarka, P., Ulyanov, O., Sidorchuk, M., Stepkin, S., Koliadin, V., Kalinichenko, N., Stanislavsky, A., Dorovsky, 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., Vasyukivskiy, 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., Koshovy, V., Lozinsky, A., Ivantyshyn, O., Rucker, H.O., Panchenko, M., Fischer,

- G., Lecacheux, A., Denis, L., Coffre, A., Griefsmeier, J.-M., 2016. Digital Receivers for Low-Frequency Radio Telescopes UTR-2, URAN, GURT. *J. Astron. Instrum.*, 5(4), id. 1641010-738. DOI: 10.1142/S2251171716410105
16. Melnik, V.N., Konovalenko, A.A., Rucker, H.O., Boiko, A.I., Dorovsky, V.V., Abranin, E.P., Lecacheux, A., 2011. Observations of Powerful Type III Bursts in the Frequency Range 10–30 MHz. *Sol. Phys.*, 269(2), pp. 335–350.
17. Dulk, G.A., Erickson, W.C., Manning, R., Bougeret, J.-L., 2001. Calibration of low-frequency radio telescopes using the galactic background radiation. *Astron. Astrophys.*, 365, pp. 294–300.

Received 02.03.2023

V.V. Dorovsky¹, V.M. Melnik¹, and A.I. Brazhenko²

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

² Poltava Gravimetric Observatory, Subbotin Institute of Geophysics NAS of Ukraine
27/29, Myasoyedova St., Poltava, 36029, Ukraine

GROUND BASED SUPPORT OF THE SPACE MISSION PARKER PERFORMED WITH UKRAINIAN LOW FREQUENCY RADIO TELESCOPES

Subject and Purpose. The sporadic radio emissions coming from the Sun in a broad frequency range contain a lot of important information concerning the solar corona, parameters of the radio frequency sources therein, and the parameter variations resulting from active processes on and about the Sun. These have been the reasons for recent launches of the space missions intended for studying the Sun and its corona, such as the Parker Solar Probe (PSP) and the Solar Orbiter. The present work is aimed at demonstrating effectiveness of the ground-based support for the space missions, the PSP before all, which is provided by the large Ukrainian radio telescopes of the decameter wavelength range. Another purpose has been cross-calibration of the space-borne radiometer against calibrated data from a ground-based instrument.

Methods and Methodology. One of the remote diagnosis techniques widely used with respect to the solar corona is to analyze parameters of the radio frequency emissions from sources lying at a variety of altitudes within the corona. The methodology of such joint, space-borne/terrestrial investigations suggests simultaneous observations of certain individual events during closest approach of the space probe PSP to the Sun, with analysis over a widest possible frequency range. The data obtainable within overlapping frequency bands are proposed for calibrating the on-board radio receivers of the space probe.

Results. The methodology proposed for joint, space-based / terrestrial observations has been substantiated. Data from the UTR-2 and URAN-2 radio telescopes and the space probe PSP have been used to plot the dynamic and the polarization spectra of the June 9, 2020 solar bursts, with identification and comparison of the relevant individual events. A joint dynamic spectrum of these bursts has been obtained for the frequency band of 0.5 to 32 MHz. The calibrated data from the ground-based radio telescopes have allowed performing cross-calibration of the HF receiver in the FIELDS-PSP data taking module within the frequency band of 10 to 18 MHz.

Conclusions. The paper has provided evidence of an effective ground-based support for the space mission PSP on the part of large Ukrainian radio telescopes. Examples of joint observations have been given, and a methodology described which is employed for cross-calibrating the HF receivers of the FIELDS-PSP module. Prospects are outlined of further ground-based support for solar space research missions.

Keywords: the Sun; UTR-2 radio telescope, space probe PSP, ground-based support, spectral density, power flux, calibration.