

О. О. Станіславський, О. О. Коноваленко, В. В. Захаренко, І. М. Бубнов,
Я. С. Вольвач, В. В. Доровський, А. О. Коваль, К. Ю. Милостна

Радіоастрономічний інститут Національної академії наук України, Харків

СКООРДИНОВАНІ СИНХРОННІ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ОБ'ЄКТІВ СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ МЕТОДАМИ НАЗЕМНО-КОСМІЧНОЇ НИЗЬКОЧАСТОТНОЇ РАДІОАСТРОНОМІЇ

Наведено результати досліджень радіовипромінювання об'єктів Сонячної системи і планет шляхом скоординованих міжнародних спостережень за допомогою найбільших в світі низькочастотних українських радіотелескопів, а також космічних місії. Показано високу ефективність спостережень на декаметрових радіохвилях для вивчення сонячного і планетного радіовипромінювання, викидів корональних мас, космічної погоди, блискавок на планетах.

Ключові слова: радіовипромінювання блискавок планет, кутова структура джерела сонячних сплесків, магнітні поля сонячної корони, низькочастотна радіоастрономія, космічні місії

Зараз в усьому світі відбувається бурхливий прогрес у розвитку низькочастотної радіоастрономії (декаметровий і метровий діапазони довжин хвиль). В Європі, США, Австралії будуються радіотелескопи нового покоління для функціонування на частотах нижче 100 МГц (LOFAR, E-LOFAR, LSS, MWA, LWA та інші) [4, 11]. Стала очевидною надвисока інформативність низькочастотної радіоастрономії, яка дає дані, що недоступні іншим методам астрофізики, у вивченні Сонячної системи та Всесвіту в цілому. Значною мірою це було доведено українською школою низькочастотної декаметрової радіоастрономії завдяки створенню, модернізації і використанню найбільших у світі радіотелескопів УТР-2 та УРАН (8–30 МГц), а також новітньої антенної решітки ГУРТ (8–70 МГц) [2, 8]. Ці інструменти дозволили отримати велику кількість пріоритетних, добре відомих в світі наукових ре-

зультатів, у тому числі у міжнародних дослідженнях [5]. З іншого боку, майже з самого початку космічної ери активно реалізуються космічні проекти з використанням бортових низькочастотних радіоастрономічних систем. Це зумовлено тим, що космічне радіовипромінювання не досягає Землі на частотах $f < 8\text{--}12$ МГц (а інколи навіть $f < 15$ МГц), оскільки земна іоносфера діє як металевий екран. Крім того, як завжди, для покращення досліджень цікаво наблизитися до об'єкта досліджень. Зараз успішно функціонують різноманітні низькочастотні місії (діапазон частот 1–16 МГц) STEREO, WIND, «Cassini», вже запущено апарат «Juno», планується здійснити місії «Solar Orbiter», «FarSide Explorer» та інші. Але вказані місії мають дуже суттєвий недолік — через технічні обмеження космічні антенні системи складаються всього із кількох елементів і тому дають дуже низьку чутливість [10]. Крім цього, такі космічні апарати (КА) не завжди можуть наблизитися достатньо близько до досліджуваних об'єктів (наприклад Сонця), а

термін їхнього життя і велике коло завдань істотно обмежують можливості таких місій.

Де кілька років тому українські радіоастрономи запропонували нову концепцію скоординованих спостережень об'єктів Сонячної системи та інших космічних об'єктів за допомогою найбільших українських радіотелескопів і космічних місій [5]. Наземні радіотелескопи мають набагато більшу чутливість, часову, частотну і просторову роздільні здатності, динамічний діапазон і спільну з космічними інструментами смугу частот. Було показано, що такий підхід дає дуже багато переваг в дослідженнях спорадичного і спокійного сонячного і планетного радіовипромінювання, викидів корональних мас, космічної погоди, сонячного вітру, блискавок на планетах. Деякі подібні міжнародні експерименти вже були успішно реалізовані, опубліковані і схвалені міжнародною спільнотою в Європі і США. Вкрай назріла необхідність подальшого розвитку цієї концепції, доведення її ефективності і актуальності, проведення нових вимірювань вже зараз і підготовки майбутніх міжнародних наземно-космічних досліджень.

У цій статті наводяться деякі недавні результати досліджень з метою підвищення чутливості, роздільної здатності, смуги аналізу, надійності досліджень радіовипромінювання Сонця, міжпланетного середовища, планет шляхом скоординованих міжнародних спостережень за допомогою найбільших в світі низькочастотних українських радіотелескопів УТР-2, УРАН, ГУРТ, а також космічних місій STEREO, WIND, «Cassini» та інші.

ДОСЛІДЖЕННЯ РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ БЛИСКАВОК НА ПЛАНЕТАХ СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ

Блискавки на планетах Сонячної системи (крім Землі) було відкрито за допомогою КА на рубежі 1980-х рр. Однак, на жаль, вимірювання за допомогою КА мають дуже невисоку часову роздільну здатність — десятки мілісекунд. Наявне приймальне обладнання, розроблене в Радіоастрономічному інституті НАН України, дозволило проводити дослідження структури електростатичних розрядів на Сатурні з найвищою доступною часовою роздільною здатністю (приблизно 15 нс). Таким чином, за допомогою цього облад-

нання була досліджена мікроструктура блискавок, яка раніше була відкрита на радіотелескопі УТР-2 [3]. В рамках досліджень електростатичних розрядів на Сатурні спільно з КА «Cassini» були отримані такі результати:

в результаті обробки 30 % високошвидкісних даних шторму на Сатурні зареєстровано близько 4000 подій — компонентів мікроструктури блискавок;

виявлені субмілісекундні сплески містять основну енергію блискавок (рис. 1, а);

у блискавках спостерігаються мікросекундні сплески, які, ймовірно, можуть пояснити достатньо «плоский» спектр електростатичних розрядів, реєстрований КА «Cassini» у смузі 1 — 16 МГц;

при високій часовій роздільній здатності необхідно компенсувати дисперсійну затримку в середовищі розповсюдження радіосигналу (рис. 1, б);

усереднені профілі блискавок показують, що, як правило, мілісекундні сплески починається з короткого (мікросекундного) сплеску (рис. 1, в);

часової роздільної здатності апаратури достатньо, щоб стверджувати, що можливий внесок у загальну енергію менш тривалих (наносекундних) імпульсів буде малим (рис. 1, г).

При виконанні цього аналізу були застосовані спеціальні алгоритми обробки, що дозволяють очищати експериментальні дані від перешкод природного та штучного походження [1]. Наступний крок у дослідженні електростатичних розрядів (блискавок) є пошук їх на інших планетах сонячної системи. З цією метою нещодавно були проведені тривалі спостереження радіовипромінювання Урана у період наявності в атмосфері планети великомасштабних хмарних утворень. Обробка даних наразі триває.

ДОСЛІДЖЕННЯ КУТОВОЇ СТРУКТУРИ СОНЯЧНИХ СПЛЕСКІВ

Кутові розміри джерел сонячних сплесків досі недостатньо глибоко вивчені на низьких частотах. Це пояснюється тим, що такі спостереження вельми трудомісткі, але вони вкрай необхідні для розуміння особливостей природи виникнення самих сплесків, а також для розуміння явищ, пов'язаних з ними (корональних викидів маси,

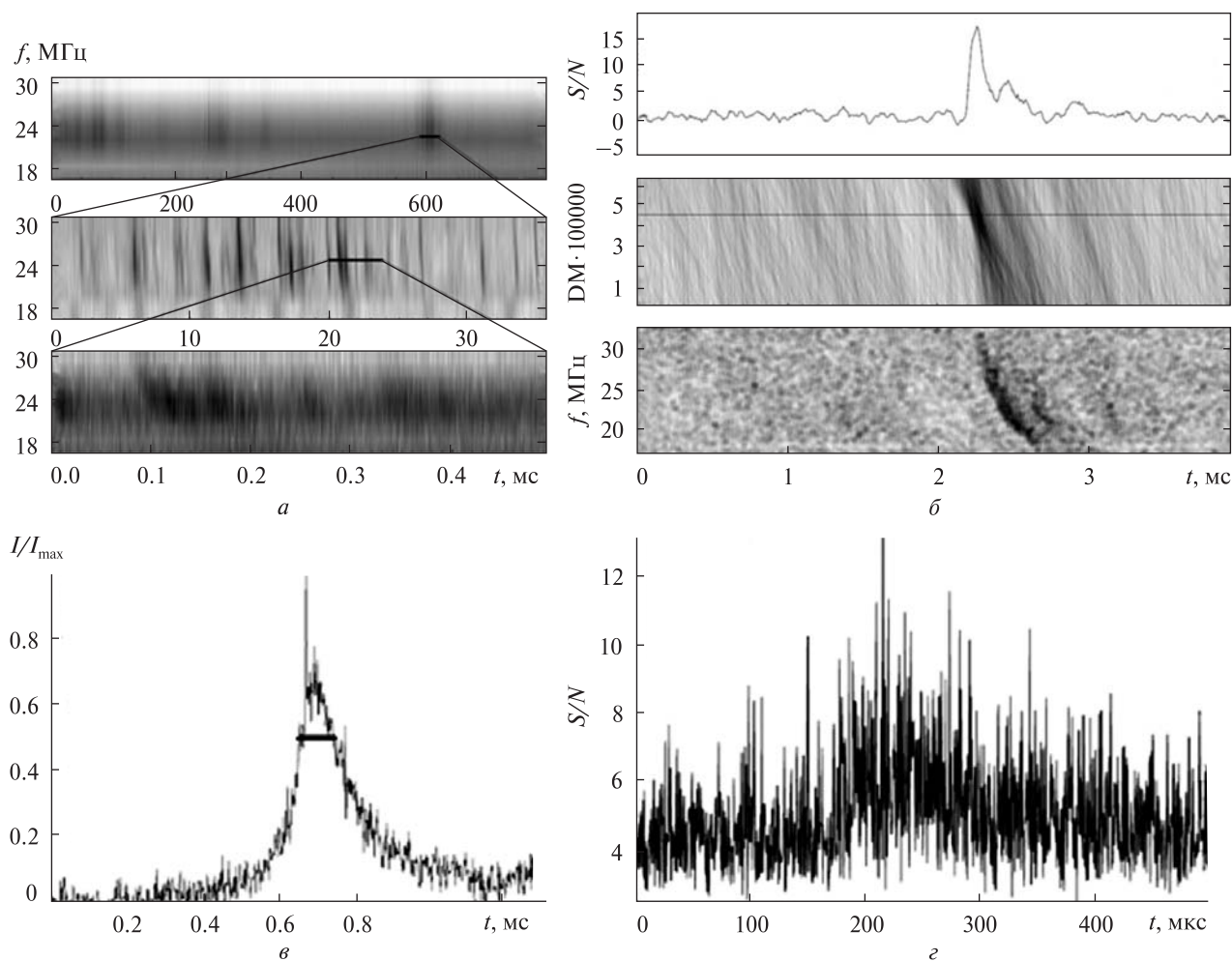


Рис. 1. Різні часові масштаби блискавок в атмосфері Сатурна: *a* — секундні, субмілісекундні та мікросекундні компоненти на динамічних спектрах, *б* — усунення дисперсійної затримки в середовищі поширення сигналу, *в* — середній субмілісекундний сплеск з початковою мікросекундною складовою, *г* — індивідуальний сплеск з часовою роздільною здатністю 0.5 мкс (після усунення дисперсійної затримки)

спалахів тощо). За допомогою синтезованої матриці із 125 променів діаграми спрямованості на телескопі LOFAR були виконані спостереження просторових характеристик сплесків III типу [7]. Результати цих спостережень засвідчили, що зазначені сплески сталися на висотах, які перевищують значення, передбачені 1D-моделлями радіальної електронної щільності, і це пов'язано з розширенням фронту корональних викидів маси. В аналізі останніх використовувалися синхронні дані KA SDO і SOHO.

Слід зауважити, що для вивчення просторових властивостей сплесків III і IIIb типів також

було застосовано геліограф українського радіотелескопу УТР-2 [6]. Кожна його геліограма складається з 40 точок (променів діаграми спрямованості) в результаті послідовного сканування в *UV*-площині, де сигнали кожного променя записуються з високими часовим (2.482 мс) та спектральним (4 кГц) роздільними здатностями. Швидкість отримання геліограм складає один кадр за 3 с. За допомогою таких спостережень ми отримуємо тривимірну структуру кутової еволюції джерела сонячного сплеску (в *UV*-площині на окремих частотах в залежності від часу). З реєстрацій геліографа добре видно, що тривалість

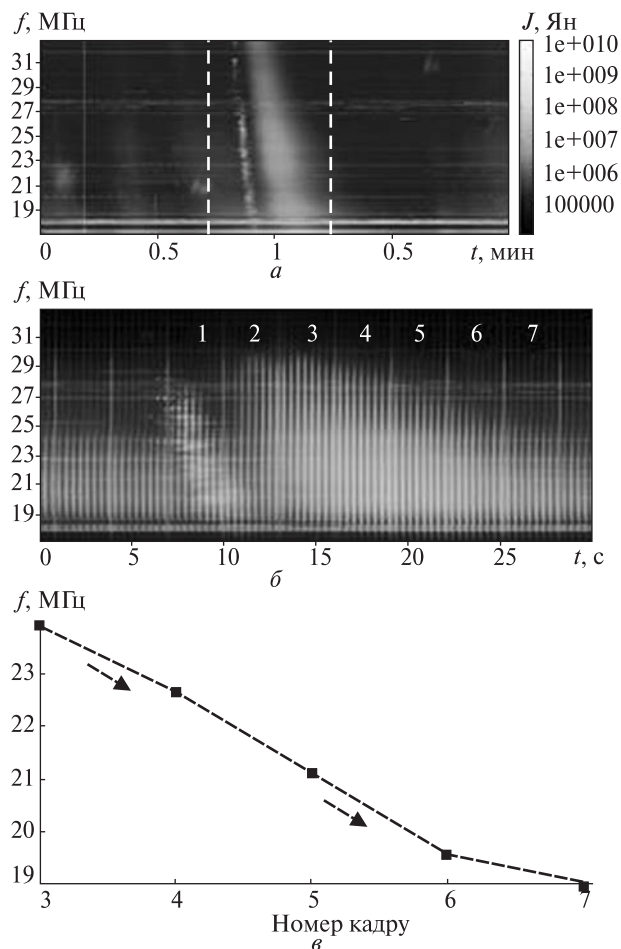


Рис. 2. *a* — динамічний спектр, зареєстрований на УТР-2 10 квітня 2013 р. Початок відліку по осі часу відповідає 09:33:47 UT; *б* — послідовний запис, отриманий за допомогою геліографічних вимірювань; *в* — еволюція положення максимуму джерела сплеску від частоти і часу

сплеску збільшується зі зменшенням частоти (рис. 2, *a*). Крім того, пік інтенсивності сплеску рухається вочевидь у бік низьких частот (рис. 2, *б*), тобто пучок електронів надходить від Сонця до великих висот сонячної корони (рис. 2, *в*). Еволюція піку в часі від кадру до кадру вказує напрямки руху джерела цього сплеску. З огляду великої різноманітності на низьких частотах реєстрованих сонячних сплесків (II, III і IV типів, спайків, дрейфуючих пар та ін.) становить інтерес і планується у майбутньому проведення аналогічних вимірювань для різних типів сплес-

ків. Це дозволяє спільно з даними КА виявити, яке місце в сонячній короні займає джерело обраного сплеску серед інших одночасних проявів сонячної активності (наприклад, корональних викидів маси).

ДОСЛІДЖЕННЯ МАКРОСКОПІЧНИХ МАГНІТНИХ ПОЛІВ У СОНЯЧНОЇ КОРОНІ

Сонячна активність дуже тісно пов'язана з еволюцією магнітних полів на Сонці. Тому їхнє вимірювання різними способами, особливо в сонячній короні, дуже важливе для сонячної астрофізики. Одним із цікавих засобів визначення макроскопічних магнітних полів у сонячній короні є аналіз частотно-часових властивостей сонячних сплесків, на які корональне магнітне поле впливає. З цією метою було досліджено сплеск типу зебра-структура, який спостерігався 2 червня 2011 р. на УТР-2. Його аналіз дозволяє встановити зв'язок цього сплеску з бернштейновими модами і визначити рівень магнітних полів у верхніх шарах корони. Для зменшення впливу модельних уявлень отриманий результат порівнювався з величиною магнітного поля зі спостережень сплеску II типу з розщепленням смуг, який був зареєстрований годинию пізніше. Завдяки даним КА GOES і STEREO вдалося встановити, що обидва сплески з'явилися з однакових частин корони. Розщеплення смуг сплеску II типу є наслідком механізму генерації цього сплеску завдяки ударній хвилі, що дуже відрізняється від механізму генерації зебра-структури на гармоніках гіромагнітної частоти. Разом це дозволяє дослідити магнітне поле корони двома різними способами. Порівняння значення магнітного поля з цих спостережень показують їхню повну згоду і дорівнюють 43 ± 3 мкТл на відстані 1.95 сонячних радіусів від центра Сонця [9]. Знижена величина коронального поля пояснюється особливостями затяжного мінімуму сонячної активності.

Проведені в рамках роботи дослідження дозволили отримати нові результати, що стосуються спорадичного радіовипромінювання Сонця, магнітного поля корони та радіовипромінювання блискавок на планетах Сонячної системи за допомогою скоординованих міжнародних спо-

стерезень на найбільших в світі низькочастотних українських радіотелескопах, а також космічних місій. Усе це дозволяє стверджувати, що виконання таких досліджень можна реалізувати з мінімальними витратами в рамках програми, спрямованій на підтримку участі українських вчених у виконанні міжнародних космічних проектів.

Автори вдячні командам космічних місій «Cassini», STEREO, GOES, SOHO, SDO за можливість роботи з даними вимірювань цих КА. Роботу виконано за підтримки цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень (Державний реєстраційний № 0114U002814).

1. Васильева Я. Ю., Захаренко В. В., Коноваленко А. А., Зарка Ф. и др. Декаметровый обзор северного неба с целью поиска пульсаров и источников транзиентного излучения. Первые результаты // Радиофизика и радиоастрономия. — 2014. — **19**, № 3. — С. 197—205.
2. Коноваленко А. А. Перспективы низкочастотной радиоастрономии // Радиофизика и радиоастрономия. — 2005. — **10**, № 5. — С. 86—115.
3. Милостная К. Ю., Захаренко В. В., Коноваленко А. А. и др. Тонкая временная структура молний на Сатурне // Радиофизика и радиоастрономия. — 2014. — **19**, № 1. — С. 10—19.
4. Ellingson S. W., Clarke T. E., Cohen A., et al. The long wavelength array // Proc. IEEE. — 2009. — **97**, N 8. — P. 1421—1430.
5. Konovalenko A. A., Stanislavsky A. A., Rucker H. O., et al. Synchronized observations by using the STEREO and the largest ground-based decameter radio telescope // Experim. Astron. — 2013. — **36**, N 1-2. — P. 137—154.
6. Koval A. A., Stanislavsky A. A., Konovalenko A. A. Angular study of the III type solar bursts by Ukrainian decameter heliograph of UTR-2 // EGU General Assembly. — Vienna, Austria, 2014. — EGU2014-655.
7. Morosan D. E., Gallagher P. T., Zucca P., et al. LOFAR tied-array imaging of Type III solar radio // Astron. and Astrophys. — 2014. — **568**. — A67.
8. Stanislavsky A. A., Bubnov I. N., Konovalenko A. A., et al. First Radio Astronomy Examination of the Low-Frequency Broad-Band Active Antenna Subarray // Adv. Astron. — 2014. — **2014**. — Article ID 517058.
9. Stanislavsky A. A., Konovalenko A. A., Koval A. A., et al. Coronal magnetic field strength from decameter zebra-pattern observations: complementarity with band-splitting measurements of associated type II burst // Solar Phys. — 2015. — **290**, N 1. — P. 205—218.
10. Stanislavsky A. A., Konovalenko A. A., Rucker H. O., et al. Antenna Performance Analysis for Decameter Solar Radio Observations // Astron. Nachr. — 2009. — **330**, N 7. — P. 691—697.
11. Tingay S. J., Goeke R., Bowman J. D., et al. The Murchison Widefield array: the square Kilometre array precursor at low radio frequencies // Publ. Astron. Soc. Austral. — 2013. — **30**. — Article e007.

Стаття надійшла до редакції 18.12.14

*А. А. Станиславский, А. А. Коноваленко,
В. В. Захаренко, И. Н. Бубнов, Я. С. Вольвач,
В. В. Доровский, А. А. Коваль, К. Ю. Милостная*

Радиоастрономический институт
Национальной академии наук Украины, Харьков

СКООРДИНОВАННЫЕ СИНХРОННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ОБЪЕКТОВ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ МЕТОДАМИ НАЗЕМНО- КОСМИЧЕСКОЙ НИЗКОЧАСТОТНОЙ РАДИОАСТРОНОМИИ

Приведены результаты исследований радиоизлучения объектов Солнечной системы путем скоординированных международных наблюдений с помощью крупнейших в мире низкочастотных украинских радиотелескопов, а также космических миссий. Показана высокая эффективность наблюдений на декаметровых радиоволнах для изучения солнечного и планетного радиоизлучения, выбросов корональных масс, космической погоды, молний на планетах.

Ключевые слова: радиоизлучения молний планет, угловая структура источников солнечных всплесков, магнитные поля солнечной короны, низкочастотная радиоастрономия, космические миссии

*A. A. Stanislavsky, A. A. Konovalenko,
V. V. Zakharenko, I. N. Bubnov, Ya. S. Volvach,
V. V. Dorovskyy, A. A. Koval, K. Yu. Mylostna*

Institute of Radio Astronomy
of the National Academy of Science of Ukraine, Kharkiv

COORDINATED SYNCHRONOUS OBSERVATIONS OF SOLAR SYSTEM OBJECTS USING THE GROUND- AND SPACE-BASED METHODS OF LOW-FREQUENCY RADIO ASTRONOMY

The results of investigations of the Solar System objects by the coordinated international observations using the world's largest low-frequency Ukrainian radio telescopes and space missions are presented. They are in favor for a high efficiency of decameter-wavelength observations for the studies of solar and planetary radio emissions, coronal mass ejections, space weather and planetary thunderstorms.

Key words: radio emission from planet thunderstorms, angular structure of solar burst sources, magnetic fields of solar corona, low-frequency radio astronomy, space missions