

## ОБРОБКА ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

---

УДК 621.371.3(15):521.8:524.3

### АВТОМАТИЗОВАНЕ ВИЯВЛЕННЯ РАДІОТЕЛЕСКОПОМ УРАН-3 СПЛЕСКІВ ДЕКАМЕТРОВОГО РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ СОНЦЯ

**В. В. Кошовий, О. Л. Івантишин, О. О. Коноваленко, Р. Т. Ногаць, Б. П. Русин,  
Б. С. Харченко, А. Б. Лозинський, І. М. Романишин, Р. І. Романишин**

**Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів**

**E-mail: koshovy@ipm.lviv.ua**

Проаналізована проблема автоматизованого визначення параметрів сплесків спорадичного декаметрового радіовипромінювання Сонця за допомогою радіотелескопа УРАН-3 з урахуванням його функцій у складі системи радіоінтерферометрів “УРАН”. Запропонована інформаційна технологія автоматизованого виявлення радіосплесків II типу на динамічних спектрограмах, зареєстрованих широкосмуговим цифровим приймачем радіотелескопа УРАН-3 під час довготривалих спостережень спорадичної компоненти радіовипромінювання Сонця. Описана технологія пошуку і виявлення радіосплесків II типу та визначення таких їх параметрів, як швидкість дрейфу в частотних піддіапазонах, інтенсивність, тривалість та частотна ширина сплесків на деяких вибраних частотах. Ефективність розробленої технології підтверджена результатами довготривалих радіоастрономічних спостережень, виконаних з допомогою радіотелескопа УРАН-3 упродовж 2011–2017 рр.

**Ключові слова:** *спорадичне радіовипромінювання Сонця, динамічна спектрограма, радіосплеск II типу, декаметровий радіотелескоп УРАН-3, перетворення Радона, інформаційна технологія.*

### AUTOMATED DETECTION OF SUN DECAMETRE RADIO BURSTS BY THE RADIO TELESCOPE URAN-3

**V. V. Koshovyy, O. L. Ivantyshyn, A. A. Konovalenko, R. T. Nogach, B. P. Rusyn,  
B. S. Kharchenko, A. B. Lozynskyi, I. M. Romanyshyn, R. I. Romanyshyn**

**H. V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Lviv**

The problem of the automated determination of the parameters of the sporadic decameter radio emission of the Sun with help of the radio-telescope URAN-3 taking into account its functions in the Ukrainian VLBI URAN structure is analyzed. An overview of alternative solutions of the problem is carried out. The technology of searching and detecting the radio bursts of type II and determination of such parameters as speed of drift in frequency sub bands, intensity, and duration and frequency width of bursts for a number of selected frequencies are considered. The effectiveness of the developed technology is confirmed by the results of long-term radio-astronomical observations carried out at the URAN-3 radio telescope in 2011–2017. The formed on the basis of obtained and accumulated experimental data multiparameter relative database of solar activity is intended for further studies of the relation between the helio- and the geophysical phenomena for the purpose of developing forecasting models of geophysical manifestations of solar activity and evaluating the “geoefficiency” of active solar processes.

**Keywords:** *sporadic radio emission of the Sun, dynamic spectrogram, radio burst type II, decametre radio telescope URAN-3, Radon transformation, information technology.*

Важливим напрямком сонячно-земної фізики є дослідження геоэффективних проявів сонячної активності (СА), зокрема зв'язку між подіями, що відбуваються на Сонці, в сонячному вітрі, магнетосфері, іоносфері та в компонентах біо- і геосфери [1–3]. Вважають [2], що на навколосонячний простір (НЗП) суттєво впливають три нестационарні явища (вибухового типу), пов'язані з Сонцем: сонячні спа-

© В. В. Кошовий, О. Л. Івантишин, О. О. Коноваленко, Р. Т. Ногаць, Б. П. Русин,  
Б. С. Харченко, А. Б. Лозинський, І. М. Романишин, Р. І. Романишин, 2017

лахи; потужні викиди речовини з корони Сонця (викиди корональної маси – *CME* (*Coronal Mass Ejection*)); сонячний вітер і пов'язане з ним магнетне поле. Це основні чинники космічної погоди. В літературі, в основному, розглядають можливий вплив цих явищ на магнетосферу Землі [2] за схемою (рис. 1), яка враховує, що геоєфективні чинники генеруються на Сонці, поширюються через міжпланетне середовище (МПС) і взаємодіють з магнетосферою Землі; сонячний вітер виносить у МПС магнетне поле, яке спричиняє спіральну структуру міжпланетного магнетного поля (ММП) внаслідок обертання Сонця; геомагнетне поле чутливе до найменших змін ММП, обумовлюючи геомагнетні (магнетосферні) збурення (ГМЗ) незначної інтенсивності, які досить легко спрогнозувати [2], чого не можна сказати про сонячні спалахи та *CME*, які відрізняються значно більшою потужністю, різноманіттям фізичних процесів і розвиваються швидко (за хвилини).

Сонячний спалах супроводжується викидом величезних потоків заряджених частинок різних енергій і потужними хвильовими процесами та проявляється у всіх діапазонах (від  $\gamma$ -випромінювання до кілометрових радіохвиль). Вплив Сонця на Землю найвиразніший саме після спалаху.

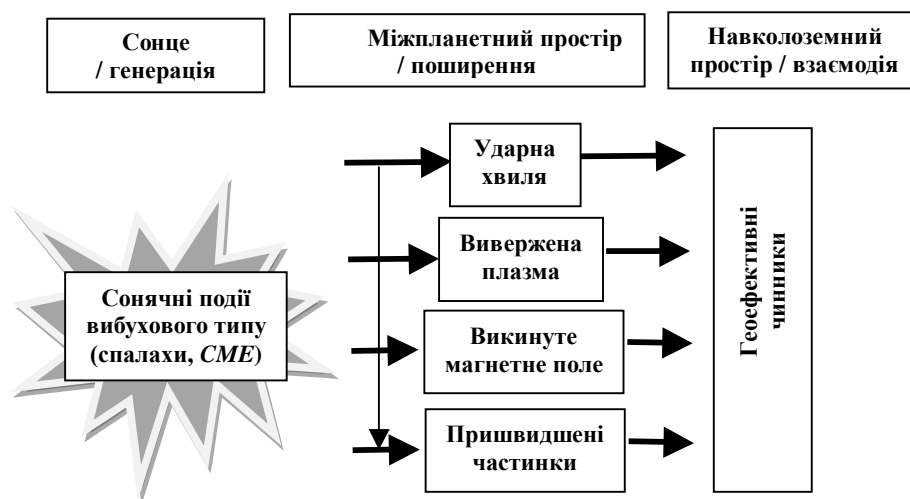


Рис. 1. Узагальнена структура формування і поширення геоєфективних чинників космічної погоди: вибухові події на Сонці (зліва); поширення створених ними збурень через міжпланетне середовище (посередині) і взаємодія з магнетосферою Землі (праворуч).

Фізичні явища в сонячній короні – ключ до розуміння процесів на Сонці і важливий передвісник подальших подій у геосфері. В короні проявляються всі форми СА, зокрема і генерація радіовипромінювання (РВ), яку можна використати як для дистанційного зондування процесів у геліосфері і МПС, так і для оцінювання їх геоєфективності [4–7].

**Об'єкт та засоби досліджень.** Зосередимо увагу на автоматизації обробки даних, отриманих під час спостережень спорадичної компоненти декаметрового (ДКМ) РВ Сонця радіотелескопом (РТ) УРАН-3, який входить до складу системи радіоінтерферометрів з наддовгою базою (РНДБ) УРАН [8, 9]. Ця компонента містить різні типи радіосплесків (РС), породжених активними процесами на Сонці і за якими можна визначати збурення, що супроводжують спалах, їх характеристики, очікувану потужність. Діагностика РС – один із підходів до прогнозування геліообумовлених геофізичних ефектів за зв'язками між типами РС та геоєфективними подіями, що виникають внаслідок СА [2–7, 10–13]. Це вимагає довготривалих спостережень РВ Сонця і автоматизованого оброблення великих масивів зареєстрованої інформації, щоб виявити та ідентифікувати типи РС.

В радіодіапазоні випромінювання Сонця на різних частотах генерується на різних висотах сонячної атмосфери. Мікрохвильові РС виникають у хромосфері та нижній короні, їх інтенсивність і частотний спектр використовують як джерело інформації про ефективність прискорення частинок (інтенсивність потоків протонів та їх енергетичний спектр). Метрові та ДКМ РС генеруються в короні та містять інформацію про умови виходу частинок у МПС [2].

За зв'язком між параметрами *SME* і характеристиками мікрохвильових РС можна виділяти зони, де зосереджені події без *SME* і з ними. *SME* і ударні хвилі, поширюючись у сонячній короні, генерують спорадичне РВ – РС II і IV типів [2], які є ознаками якісної діагностики геоэффективних спалахів. Зв'язок між *SME* і РС II і IV типів, щоб прогнозувати ГМЗ, досліджують давно [2, 4, 5, 7, 10, 11], однак, достовірний кількісний критерій для оцінювання ступеня “геоэффективності” спалахів відсутній і досі. Тому моніторинг сонячної активності та дослідження її проявів у радіодіапазоні не втрачають актуальності [11].

В Україні для експериментальних досліджень РВ Сонця в ДКМ діапазоні використовують, в основному, інструменти, що входять до складу РНДБ УРАН. За їх результатами виявлено нові особливості і види спорадичного РВ Сонця (зокрема, невідомі раніше тонкі частотно-часові структури РС III, II, IV типів; дрейфуючі пари; спайки; *S*-, *V*-, *J*- сплески, які містять нову інформацію про сонячну корону і формують новий погляд на вивчення сонячно-земних зв'язків [5, 6–10].

Проблемі автоматизації виявлення та ідентифікації типів РС під час аналізу великих масивів експериментальної інформації присвячені праці [11–13]. Зокрема, праця [12] – автоматизації пошуку саме РС II типу і презентує новий метод автоматичного їх розпізнавання, реалізований у другій версії автоматизованої системи ідентифікації радіосплесків ARBIS 2.

Попередня версія (ARBIS 1) розроблена для виявлення РС III типу (методика описана раніше [11]). ARBIS 2 використовує ті ж методики, але враховує, що тривалість РС II типу на ~ 2 порядки більша, ніж III типу, тому зовнішній вигляд їх динамічних спектрів (ДС) істотно різний.

Методика ARBIS 2 ґрунтується на апроксимації РС II типу на 2D-зображеннях ДС сегментами прямих ліній, використовує стандартне *Hough*-перетворення для їх знаходження і враховує, що у просторі *Hough*-параметрів розширені прямі сегменти в зображеннях перетворюються в локалізовані піки. Але її використання обмежене. Тому в РНДБ УРАН для реєстрації і дослідження ДС РВ Сонця потрібно створити власний інструментарій.

**Засоби досліджень.** Для ідентифікації подій у сонячній короні необхідні інструменти з відповідним просторовим, часовим і спектральним розділенням та з достатнім динамічним діапазоном для одночасної миттєвої реєстрації подій різних за інтенсивністю масштабів [5, 6, 8, 9]. Для спостережень ДКМ компоненти РВ Сонця РТ УРАН-3 оснащений цифровою системою реєстрації і накопичення даних, яка дає можливість формувати ДС (в смугі 16,5÷33 МГц з розділенням  $\Delta f = 12$  кГц,  $\Delta t = 1$  мс÷1 хв) і параметри якої (кількість точок Фур'є-перетворення, віконна функція, кількість парціальних смуг, вхідна смуга, стала інтегрування, розрядність вхідного й вихідного потоків, параметри частотної фільтрації вихідних даних) можна змінювати.

Для радіоспостережень Сонця реєстрували сигнал у вигляді ДС з відстежуванням переміщення Сонця небесною сферою в режимі дискретного (20-хвилинного) сканування променем антени РТ УРАН-3. У такому режимі впродовж 2011–2017 рр. виконали довготривалі сесії експериментальних спостережень (~ 10<sup>4</sup> год).

РС II типу (час існування до 10...15 хв, неполяризоване або слабо поляризоване вузькосмугове РВ) з'являються в результаті особливо сильних хромосфер-

них спалахів. Механізм їх виникнення – плазмові коливання, які збуджує ударна хвиля, що поширюється від області спалаху. Частота їх випромінювання зменшується з ростом висоти джерела над поверхнею Сонця. На відміну від РС III типу вони потужніші, дрейфують за частотою в бік низьких частот (~ 100 кГц/с) значно повільніше, швидкість їх переміщення набагато нижча (~ 1000 км/с). Для прикладу на рис. 2 подано РС II типу на одному із 2D-зображень ДС, зареєстрованого РТ УРАН-3.

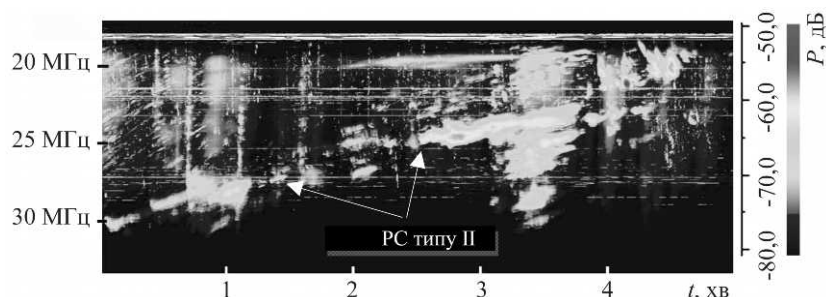


Рис. 2. Радіосплеск типу II на 2D-зображенні динамічного спектра, зареєстрованого радіотелескопом УРАН-3.

**Результати та їх обговорення. Постановка задачі.** Виявлення часових областей з високою ймовірністю знаходження в них РС II типу належить до задач розпізнавання образів, алгоритми розв'язання яких різняться складністю, ресурсоемісністю і типом. Деякі відомі алгоритми реалізовані як спеціалізоване програмне забезпечення (ПЗ), деякі – як бібліотеки, які можна інтегрувати у власне ПЗ [12]. Але застосування останніх дещо ускладнене: вони не супроводжуються програмним кодом; не піддаються аналізу; невідомо, які функціональні перетворення реалізує такий алгоритм (доводиться довіряти розробнику); часто містять неточності і їх неможливо реалізувати у вигляді програми.

**Математичний апарат.** Для детектування ДКМ РС II типу пропонуємо *Radon*-перетворення [14, 15]. Якщо  $f(x, y)$  – функція двох змінних, визначена на всій площині і швидко загасає на безмежності (так, щоб існували відповідні невластні інтеграли), то її *Radon*-перетворення визначаємо як інтеграл від функції вздовж прямої, перпендикулярної вектору  $\vec{n} = (\cos \varphi, \sin \varphi)$ , яка проходить на відстані  $s$  (вимірній уздовж вектора  $\vec{n}$  з відповідним знаком) від початку координат:

$$R(s, \varphi) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \delta(x \cos \varphi + y \sin \varphi - s) dx dy. \quad (1)$$

Для функції, відмінної від нуля в обмеженій області, межі інтегрування задають межі цієї області. Якщо функція  $f(x, y)$  відмінна від нуля в точці  $(x_0, y_0)$ , то в *Radon*-просторі функція  $R(s, \varphi)$  відмінна від нуля на косинусоїді  $s = x_0 \cos \varphi + y_0 \sin \varphi = \sqrt{x_0^2 + y_0^2} \cos(\varphi - \varphi_0)$ , де  $\varphi_0 = \arctg(y_0/x_0)$ .

**Попереднє опрацювання різноформатних даних.** Оскільки досліджуємо геофективні прояви СА, то експериментальні результати, отримані з допомогою РТ УРАН-3, доповнили даними з різних джерел, поданими у мережі Інтернет (бази даних космічних обсерваторій (SOHO, SDO, GOES, TESIS) та WDC for Geomagnetism), а також власних спостережень природного атмосферного інфразвуку та геоелектричного поля. Дані, зібрані з різних джерел, знаходяться у файлах різних форматів, неструктуровані та непридатні для комплексного автомати-

зованого оброблення. Тому розробили алгоритми, які опрацьовують вхідні файли форматів *.dat*, *.doc*, *.txt*, *.html* (одержані безпосередньо з комп'ютерної мережі) і зводять їх до структурованих таблиць.

**Попередня обробка ДС.** Детектування РС II типу зводимо до детектування відрізків ліній на 2D-зображенні ДС. За відсутності шумів на вхідному зображенні лінія у *Radon*-просторі матиме вигляд точки. Через зашумленість вхідного зображення дані у *Radon*-просторі теж зашумлені. Тому під час детектування ліній технологія передбачає фільтрацію зображень (вхідного і у *Radon*-просторі).

Алгоритм детектування ДКМ РС II типу на основі зображення ДС ґрунтується на апріорній інформації про вхідне зображення, яке найчастіше містить три типи структур: завади від радіостанцій (горизонтальна лінія на частоті радіостанції), РС III типу (лінії, близькі до вертикальних) та РС II типу (нахилени "лінії" (рис. 2), швидкість дрейфу РС визначає коефіцієнт нахилу ліній). Етапи і кроки реалізації алгоритму детектування ДКМ РС II типу такі.

Перший етап. *Крок 1.1:* отримання зображення  $R(s, \varphi)$  у *Radon*-просторі  $(s, \varphi)$  зі застосуванням 2D-*Radon*-перетворення (1) до зображення ДС. *Крок 1.2:* знаходження екстремумів функції  $R(s, \varphi_m)$ , які відповідають РС II і III типів та завадам, і визначення положення РС II типу за кутом  $\varphi_{II}$ .

Другий етап. *Крок 2.1:* побудова  $R(s, \varphi)$  у "смузі" за кутом  $\varphi$  для  $\varphi = \varphi_{II} \pm \Delta\varphi$ . *Крок 2.2:* побудова інтегральної характеристики:

$$\bar{R}_{\varphi \in (\varphi_{II} - \Delta\varphi, \varphi_{II} + \Delta\varphi)}(s, \varphi_{II}, \Delta\varphi) = \int_{(\varphi_{II} \pm \Delta\varphi)} R(s, \varphi) d\varphi. \quad (2)$$

*Крок 2.3:* оптимізація  $\bar{R}_{\varphi \in (\varphi_{II} - \Delta\varphi, \varphi_{II} + \Delta\varphi)}(s, \varphi_{II}, \Delta\varphi)$  "за шириною"  $\Delta\varphi$ , щоб забезпечити більшу "гостроту піків-максимумів" зі зміною  $s$ . *Крок 2.4:* визначення екстремуму  $\bar{R}(s_{II}, \varphi_{II}, \Delta\varphi_{opt})$ . *Крок 2.5:* визначення лінії на вхідному зображенні, яка відповідає РС II типу:

$$x \cos \varphi_{II} + y \sin \varphi_{II} = s_{II}. \quad (3)$$

Третій етап. Визначення часових характеристик РС II типу. *Крок 3.1:* отримання вхідного зображення ДС з лінією (3), яка відповідає РС II типу. *Крок 3.2:* визначення профілю інтенсивності на вхідному зображенні по лінії (3):

$$f(x, y = s_{II} - x \operatorname{ctg} \varphi_{II}). \quad (4)$$

*Крок 3.3:* встановлення порога  $f_n$  та визначення  $[x_{\min}, x_{\max}]$  (початок та кінець РС II типу), для яких  $f(x, s_{II} - x \operatorname{ctg} \varphi_{II}) > f_n$ .

Аналогічно визначають частотний діапазон РС II типу. Для аналізу 2D-зображень ДС на основі *Radon*-перетворення та детектування РС II типу створено спеціалізоване ПЗ *Radon* та *rd\_prof*, яке реалізує: підготовку зображення, вибір параметрів перетворення, обробку його результатів, завантаження необхідного файлу зображення, виконання з ним маніпуляцій та збереження, масштабування, вибір діапазону кутів огляду та кроку, аналіз локалізації РС на зображенні ДС тощо. Алгоритм виділення треків РС використовує особливість *Radon*-перетворення: у *Radon*-просторі кожній лінії відповідає точка, в якій "фокусується" набір кривих, що відповідають її зображенню, причому положенню лінії та її кута нахилу відповідає унікальна "фокусна" точка у *Radon*-просторі. З реальними даними пошук здійснюють не у всьому діапазоні можливих кутів нахилу, а у звуженому до 2÷8 градусів. Важливо також, що швидкості частотного дрейфу РС II і

III типу суттєво відрізняються як між собою, так і від аналогічних параметрів основних типів завад – пошкоджених завадою частот, змінного за частотою випромінювання радіостанцій (локаторів). Результати експериментальної апробації програм *Radon* і *rd\_prof* (рис. 3) демонструють їх ефективність для виділення області ймовірного знаходження РС у складних реальних умовах серед сукупності шумів та завад (вгорі – зображення експериментальної ДС, а внизу – виявлені РС III (рис. 3а) і II (рис. 3б) типу).

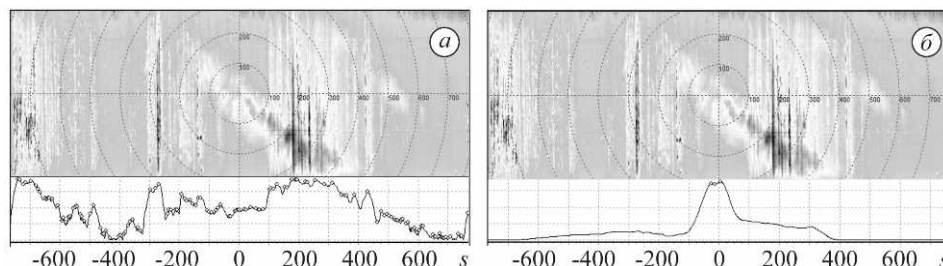


Рис. 3. Апробація ПЗ *Radon* і *rd\_prof* на даних реєстрації спектрів радіовипромінювання Сонця: вгорі – експериментально отриманий динамічний спектр, внизу – результати аналізу: а – радіосплески III типу; б – II типу.

**Визначення параметрів РС II тину. Попередня обробка.** Файл з даними, зареєстрованими РТ УРАН-3, містить заголовок і експериментальні записи радіовипромінювання Сонця двох лінійних поляризацій (два канали). На один канал припадає 4096 спектральних відліків на весь частотний діапазон (частота запису даних – 512 наборів спектральних відліків/хв). Об'єм години запису ( $N = 983041$  кб) зберігати в пам'яті комп'ютера неефективно навіть за сучасного розвитку техніки. Тому стискали дані з мінімальними втратами інформації в частотній області (в часовій це може призвести до великих втрат інформації). Для цього використали метод низькочастотної фільтрації рядів даних (згортка сигналу зі скінченною імпульсною характеристикою фільтра) з прорідженням (усереднення  $l$  послідовних членів ряду):

$$y(k) = \sum_{i=0}^m b_i x(k-i), \quad Y(j) = \frac{1}{l} \sum_{p=1}^l X(j * l - p), \quad Y(j) = \frac{1}{m} \sum_{p=1}^m y(j * m - p), \quad (5)$$

де  $y(k)$  –  $k$ -й елемент фільтрованого ряду даних;  $b_i$  –  $i$ -й елемент імпульсної характеристики фільтра;  $x(k-i)$  – елементи вхідного ряду;  $m$  – порядок фільтра;  $Y(j)$  –  $j$ -й елемент прорідженого ряду;  $X(j * l - p)$  – елементи вхідного ряду;  $l$  – кількість елементів усереднення,  $l = m$ . Елементи  $b_i$  розраховували за алгоритмом пошуку коефіцієнтів синтетичного ковзного середнього для ширини вікна, рівної 8, і отримали фільтровану проріджену послідовність вхідного ряду, в якій кількість спектральних відліків зменшилася з 4096 до 512 елементів.

**Алгоритм відображення спектральних відліків** використовує “веселкову” кольорову гаму від темно-червоного (максимальне значення амплітуди) до темно-синього кольору (мінімальне) і алгоритм змішування сусідніх основних кольорів (1275 кольорів відображають спектральні дані).

**ПЗ *QSun* (*Quiet Sun*)** відіграє важливу роль у структурі інформаційної технології, забезпечує відображення спектрів часових профілів для обраних частот у діапазоні 16,5÷33 МГц, визначення параметрів РС в цьому діапазоні, поданих набором спектральних відліків, складається з процедур/функцій/модулів, об'єднаних в єдиний модуль *Qsun.exe* для ОС *Windows*, і має віконну структуру. Вікно головної програми, вкладки інструментальної панелі *Amplitude*, *Frequency*, *Profile*, *Image*, *Track* дають можливість реалізувати: швидкий доступ, відображення спектра/часового профілю, масштабування часу, запис даних по двох по-

ляризаціях, побудову синхронізованих у часі графіків спектрального складу/часового профілю, лінійну апроксимацію (трек), аналіз відповідного явища за побудованим треком для трьох фіксованих частот – 28; 25; 20 МГц, визначення швидкості спадання частоти на обраній частоті спостереження; тривалість явища на обраній частоті; частотну ширину явища; максимальну амплітуду явища на обраній частоті тощо.

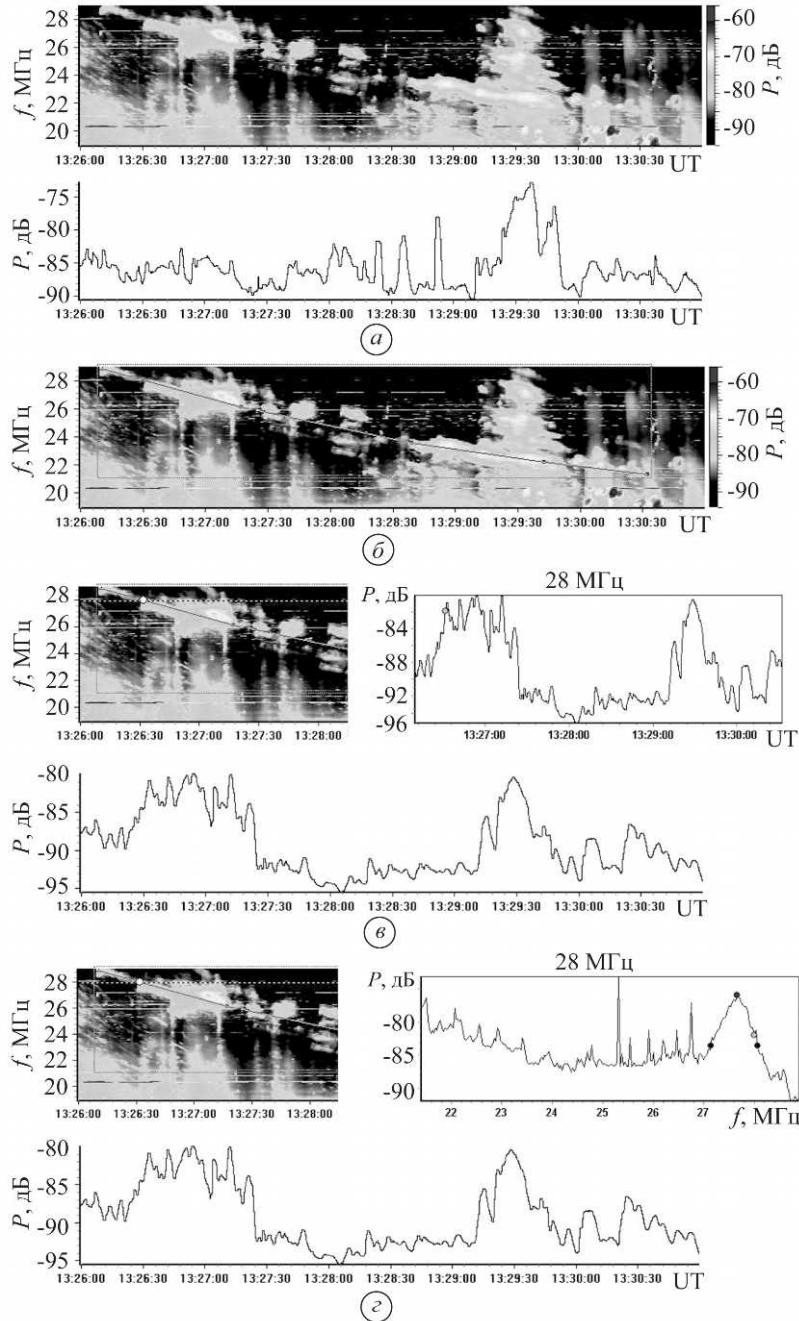


Рис. 4. Побудова треку і визначення параметрів радіосплеску II типу: *a* – радіосплеск (спектральні відліки в межах 22÷29 МГц на ділянці запису 13:26÷13:31 UT); *b* – апроксимувальний трек радіосплеску II типу, побудований на зображенні; *в* – вікно аналізу часового профілю спектра сигналу; *г* – вікно аналізу частотного профілю сигналу.

На рис. 4 зображено схему трека і визначення параметрів РС II типу: ДС із РС II типу (рис. 4а) тривалістю ~ 4 хв 18 с (частота плавно спадає в межах діапазону ~ 22÷28 МГц); апроксимувальний трек (рис. 4б) (кількість точок визначає точність апроксимації). Аналіз виконано уздовж часового (рис. 4в)/частотного (рис. 4г) профілів, вікна яких з'являються послідовно, починаючи з частоти 28 МГц. Після завершення аналізу профілів для трьох фіксованих частот сукупний результат формують у вигляді таблиці.

### ВИСНОВКИ

Дослідження виконані в межах Цільової програми НАН України “Розвиток, створення та використання найбільших у світі українських низькочастотних радіоастрономічних елементів і систем”. Розроблена інформаційна технологія дає можливість в автоматизованому режимі визначати основні параметри радіосплесків II типу ДКМ радіовипромінювання Сонця (швидкість дрейфу сплесків у частотних піддіапазонах, інтенсивність, тривалість та частотну ширину сплесків на вибраних частотах). Довготривалі (2011÷2017 рр.) радіоастрономічні спостереження на радіотелескопі УРАН-3 підтверджують ефективність розробленої технології для подальших досліджень геліо-/геофізичних зв'язків.

1. *Плазменная гелиогеофизика* / М. А. Лившиц, А. В. Степанов, Ю. Д. Жугжда и др. – М.: Физматлит, 2008. – Т. 1. – 670 с.
2. *Ермолаев Ю. И., Ермолаев М. Ю.* Солнечные и межпланетные источники геомагнитных бурь: аспекты космической погоды // Геофиз. процессы и биосфера. – 2009. – **8**, № 1. – С. 5–35.
3. *Смольков Г. Я.* Радиоизлучение Солнца и околоземный космос // Лекции БШФФ. – 2005. – Ч. 1. – С. 27–33.
4. *Warmuth A., Mann G.* The Application of Radio Diagnostics to the Study of the Solar Drivers of Space Weather // Eds. K. Scherer, H. Fichtner, B. Heber, U. Mall. – Springer, Berlin, Heidelberg, Lect. Notes Phys. 2005. – **656**. – P. 51–70.
5. *Коноваленко А. А.* Перспективы низкочастотной радиоастрономии // Радиофизика и радиоастрономия. – 2005. – **10**, спец. вып. – С. S86–S114.
6. *Мельник В. Н.* Исследование радиоизлучения Солнца в Радиоастрономическом институте // Радиофизика и радиоастрономия. – 2005. – **10**, спец. вып. – С. S54–S73.
7. *Довгохвильові сонячні радіосплески як індикатори активних процесів на Сонці* / М. Ковальчук, М. Стоділка, В. Кошовий, О. Івантишин, А. Лозинський та ін. // Вісник Львів. ун-ту. Сер. фіз. – 2011. – Вип. 46. – С. 105–112.
8. *Система декаметровых радиотелескопов УРАН как инструмент для исследований космической погоды* / А. В. Мень, С. Я. Брауде, С. Л. Рашковский // Радиофизика и радиоастрономия. – 1997. – **2**. – С. 385–401.
9. *Система декаметровых радиотелескопов УРАН как инструмент для исследований космической погоды* / И. С. Фалькович, Н. Н. Калиниченко, А. А. Коноваленко и др. // Радиофизика и радиоастрономия. – 2011. – **16**, № 2. – С. 144–153.
10. *Observations of Solar Type II bursts at frequencies 10–30 MHz* / V. N. Melnik, A. A. Konovalenko, H. O. Rucker et al. // Solar Physics. – 2004. – Vol. **222**. – P. 151–166.
11. *Automatic recognition of type III solar radio bursts: Automated Radio Burst Identification System method and first observations* / V. V. Lobzin, I. H. Cairns, P. A. Robinson, G. Steward, G. Patterson. – Space Weather, **7**, S04002 (doi:10.1029/2008SW000425).
12. *Automatic recognition of coronal type II radio bursts: the automated radio burst identification system method and first observations* / V. V. Lobzin, I. H. Cairns, P. A. Robinson // The Astrophysical J. Letters. – 2010. – **710**. – P. L58–L62.
13. *Schmidt J. M., Cairns I. H., Lobzin V. V.* The solar type II radio bursts of 7 March 2012: Detailed simulation analyses // J. Geophys. Res. Space Physics. – 2014. – **119**. – P. 6042–6061.
14. *Hough P. V. C.* 1962, US Patent 3069654.
15. *Deans S. R., Roderick S.* The Radon Transform and Some of its Applications. – New York: Wiley, 1983.

Одержано 28.08.2017