

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra27.03.203>
УДК 550.388

Л.О. Станіславський¹, І.М. Бубнов¹,
С.М. Єрін^{1,2}, А.В. Залізовський^{1,3,4}, В.М. Лисаченко¹

¹Радіоастрономічний інститут НАН України
вул. Мистецтв, 4, м. Харків, 61002, Україна
E-mail: lev.stanislavskiy@gmail.com

²Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна
проспект Незалежності, 6, м. Харків, 61000, Україна

³Центр космічних досліджень Польської академії наук
вул. Бартицька, 18А, 00-716, м. Варшава, Польща

⁴Національний антарктичний Науковий Центр
бульвар Тараса Шевченка, 16, м. Київ, 01601, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ КРИТИЧНОЇ ЧАСТОТИ ШАРУ F2 ІОНОСФЕРИ ЗА ДОПОМОГОЮ ДАНИХ ВІД ІОНОЗОНДІВ І ВІД СПОСТЕРЕЖЕНЬ СОНЯЧНИХ РАДІОСПЛЕСКІВ

Предмет і мета роботи. Дослідження часових варіацій критичної частоти в іоносферному шарі F2 через порівняльний аналіз даних іонозондових вимірювань і спостережень сонячних радіосплесків III типу.

Методи і методологія. У роботі застосовано два незалежні методи визначення критичних частот, а саме вертикальне зондування іоносфери та спостереження низькочастотних сонячних радіосплесків III типу поблизу іншого іоносферного відсічення. Використовувались дані іонозондів, один із яких розташований біля м. Зміїв (Харківська область), неподалік обсерваторії УТР-2, де вимірювались радіосплески. Сонячні радіосплески, що відіграють роль сигналів зондування, спостерігалися за допомогою елемента низькочастотної антенної решітки.

Результати. 22.05.2021 р. з 07:00 до 17:00 UT критична частота f_0F2 , досягнувши максимальної величини 5.9 МГц о 07:45...08:00 UT, плавно знижувалася до 4.9 МГц о 15:30...16:45 UT. У той час антеною для радіоспостережень на частотах 1...40 МГц було зафіксовано бурю сонячних сплесків III типу. В радіоастрономічних вимірюваннях виявлено їхнє відсічення в іоносфері. Показано, що за частотою відсічення сплесків можна оцінювати значення критичної частоти іоносфери f_0F2 .

Висновки. Порівняльний аналіз результатів спостережень сонячних радіосплесків і частотно-часових вимірювань за допомогою іонозонда показав можливість оцінювати значення критичної частоти іоносфери f_0F2 .

Ключові слова: іоносфера, шар F2, іонозондові вимірювання, радіоастрономічні спостереження, сонячні сплески, частота відсічення.

Цитування: Станіславський Л.О., Бубнов І.М., Єрін С.М., Залізовський А.В., Лисаченко В.М. Дослідження критичної частоти шару F2 іоносфери за допомогою даних від іонозондів і від спостережень сонячних радіосплесків. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2022. Т. 27. № 3. С. 203–212. <https://doi.org/10.15407/rpra27.03.203>

Citation: Stanislavsky, L.O., Bubnov, I.M., Yerin, S.M., Zalozovski, A.V. and Lisachenko, V.M., 2022. The critical frequency of the ionospheric F2-layer as obtained from ionosonde data and observations of solar radio bursts. *Radio Physics and Radio Astronomy*, 27(3), pp. 203–212. <https://doi.org/10.15407/rpra27.03.203>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2022. 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, 2022. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Вступ

Радіоастрономічні спостереження з Землі на гранично низьких частотах поблизу іоносферного відсічення мають давню передісторію. Їхню перспективність і важливість для астрофізичних досліджень неодноразово підкреслював всесвітньо відомий піонер у галузі радіоастрономії Гроут Ребер [1, 2]. У 50-х роках минулого століття він знайшов кілька місць (зокрема, поблизу озера Верхне, штат Мічиган, у північній півкулі та на Тасманії в південній півкулі), сприятливих для спостережень космічного радіовипромінювання на гектометрових довжинах хвиль. Хоча Ребер свої початкові дослідження проводив на частотах 3 300, 900 і 160 МГц, надалі він проводив дослідження і на більш довгих хвилях. У 1954 р., переїхавши до австралійського штату на Тасманії [3, 4], він зміг там побудувати антенну решітку для прийому радіовипромінювання з частотою 2.045 МГц, яка мала фазове управління антенним променем у площині північ—південь, а сканування із заходу на схід здійснювалося за рахунок обертання Землі. Це дозволило йому збудувати карту південного неба на дуже низьких частотах. Пізніше Гроут Ребер разом із Гремом Еллісом [5], відомим дослідником іоносфери, займалися дослідженням і аналізом критичних частот іоносфери над Тасманією з використанням іонозондів. Вибір Тасманії, як місця для проведення досліджень іоносфери, було пов'язано з унікальними можливостями поширення радіохвиль у цьому регіоні. Надалі їхня спільна робота переросла в багаторічну та плідну співпрацю [1, 3, 4, 6], яка супроводжувалася побудовою ще кількох низькочастотних радіотелескопів на Тасманії у 60-х та 70-х роках минулого століття. Пізніше, в 1990-х роках, цей почин продовжив інший відомий радіоастроном Білл Еріксон, який зробив важливий внесок у розвиток низькочастотної радіоастрономії. За свою кар'єру він брав участь у створенні багатьох інструментів для радіоастрономічних досліджень, зокрема до них належать Т-подібні антенні решітки в Кларк Лейк і низькочастотна антена на острові Бруні, на якій Білл Еріксон і почав проводити дослідження радіовипромінювання Сонця. Сама антена на острові Бруні мала в своєму складі ширококутовий радіоспектрометр для прийому радіохвиль у

діапазоні частот від 3 до 20 МГц [7]. Такі спостереження велися майже щодня, дані з яких викладалися у вільний доступ для завантаження з вересня 2006 р. і припинилися з січня 2015 р. після сильного урагану, що пошкодив цей інструмент. Як показували всі ці згадані вище дослідження, основною складністю таких спостережень була й є наявність інтенсивних радіоперешкод штучного та природного походження, що характерні для даного діапазону частот. Це значно знижувало результативність одержуваних даних. До цього слід додати обмежені технічні можливості того часу. У наш час бурхливий розвиток антенної техніки, її швидке моделювання в різних умовах і конфігураціях, створення нових підсилювальних елементів і різноманітна за алгоритмами цифрова обробка результатів вимірювань дозволяє по-новому підійти до зазначених завдань, вирішення яких у чомусь раніше було успішним, а в чомусь ні. Використовуючи новітні технології та досягнення, в даному випадку можна досягти більш ефективного прийому космічного випромінювання з меншим шкідливим впливом перешкод при кращій часовій і частотній роздільній здатності на записах спостережень. У результаті вдається провести унікальні експерименти, які раніше не були доступні з технічних причин. Стосовно радіоастрономічних спостережень на гранично низьких частотах одне з таких завдань може полягати в експериментальній перевірці відповідності критичної частоти іоносфери, одержуваної за допомогою вимірювань іонозондів, і на підставі спостережень сплесків III-го типу поблизу іоносферного відсічення. Останні можуть генеруватися в радіодіапазоні на частотах від кількох гігагерц до десятків кілогерц. Такому дослідженню присвячено нашу статтю. У ній буде представлено інструментальну базу, яка дозволила провести такий експеримент, а також аналіз та обговорення отриманих результатів.

1. Методи та інструменти

Дослідження земної іоносфери вже триває близько століття з моменту експериментального підтвердження Е. Апплетоном у 1926 р. її існування, за яке він отримав Нобелівську премію в 1947 р. Зараз для цього використовуються різні методи та підходи. До одного з найпоширеніших методів

її діагностики належить вертикальне зондування. Оптимальним для радіозондування іоносфери є високочастотний діапазон (1.6...30.0 МГц), оскільки плазмова частота протяжного по висоті шару F, що має найбільшу електронну концентрацію, становить від одиниць до десятка мегагерц. Радіоастрономічні методи відносяться скоріше до пасивних експериментів. Хоча на сьогоднішній момент ми знаємо досить багато про властивості космічного радіовипромінювання різної природи, проте самі джерела таких сигналів, що мають суто природне походження, не контролюються та їх слід сприймати як вони є. Тому використання космічних радіосигналів для зондування земної іоносфери має власну специфіку, яку необхідно враховувати під час аналізу результатів.

Основним результатом роботи іонозону є іонограма, яка показує частотну залежність висоти відбиття пробного сигналу від іоносфери. Сучасні досягнення в розвитку високостабільних когерентних приймально-передавальних пристроїв і цифрових систем обробки радіолокаційних даних дозволяють отримати не лише вертикальну частоту відбиття радіохвиль від іоносфери, але й оцінювати проекцію швидкості руху іоносферної плазми на хвильовий вектор k , а також величину горизонтальних градієнтів електронної концентрації. Найбільш сучасним і найпоширенішим іонозондом на сьогоднішній день є так званий дигізонд DPS4D (Digisonde-Portable-Sounder-4D). Понад сто таких приладів, об'єднаних у глобальну мережу GIRO (Global Ionosphere Radio Observatory), проводять дослідження іоносфери по всьому світу. Слід зазначити, що кількість таких станцій GIRO все ж таки виявляється недостатньою для багатьох наукових і прикладних завдань, пов'язаних так чи інакше з іоносферною тематикою. До цього слід додати той факт, що самі станції розташовано дуже нерівномірно, а відстань між ними варіює від сотень до кількох тисяч кілометрів. У результаті глобальні карти стану іоносфери з реєстрацій іонозондів виходять дуже згладженими з грубою роздільною здатністю. Стандартний темп побудови йонограм становить 15 хв, що дозволяє відстежувати регулярні сезонні та добові зміни плазмових показників чи виникнення глобальних і локальних збурень. Для проведення на-

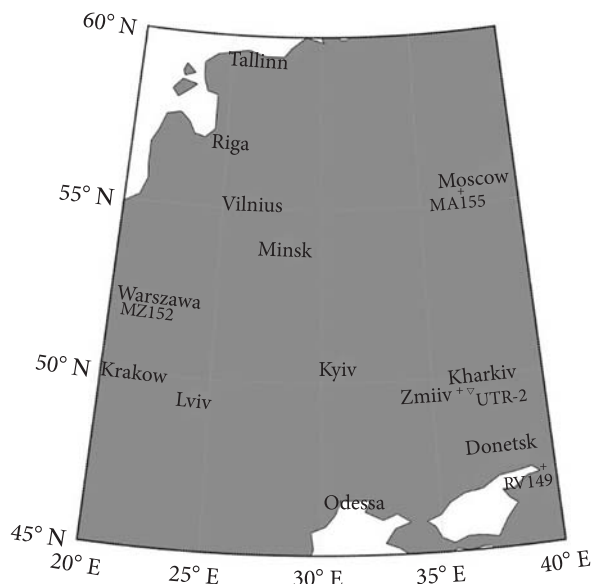


Рис. 1. Географічне розташування іонозондів (хрести), що використовуються в експерименті, та радіоастрономічної обсерваторії (трикутник)

шого експерименту буде корисною регіональна система іоносферного зондування. Оскільки радіоастрономічні спостереження проводились на радіоастрономічній обсерваторії ім. С.Я. Брауде, де знаходиться найбільший у світі декаметровий радіотелескоп УТР-2, ми обрали кілька радіозондів, які найближче розташовано до цього місця. До них ми віднесли іонозонди поблизу Варшави, Москви та Ростова (рис. 1). Проте ці станції радіозондування знаходяться на значних відстанях (близько 1 000 км) від місця радіоастрономічних спостережень.

Оскільки на території України немає жодного дигізонду, нещодавно у Радіоастрономічному інституті Національної академії наук України (РІ НАН України) було проведено роботи зі створення свого економічного портативного когерентного ВЧ-комплексу вертикального зондування іоносфери [8], оскільки купівля навіть одного загальновідомого дигізонду досить коштовна справа. Створений бюджетний комплекс дозволяє проводити іоносферну діагностику в безперервному режимі та не вимагає особливих витрат. Його основним призначенням є отримання іонограм, які можна використовувати для подальших досліджень, зокрема для визначення часових змін критичної частоти шару F під час осіннього рівнодення в умовах спокійної та

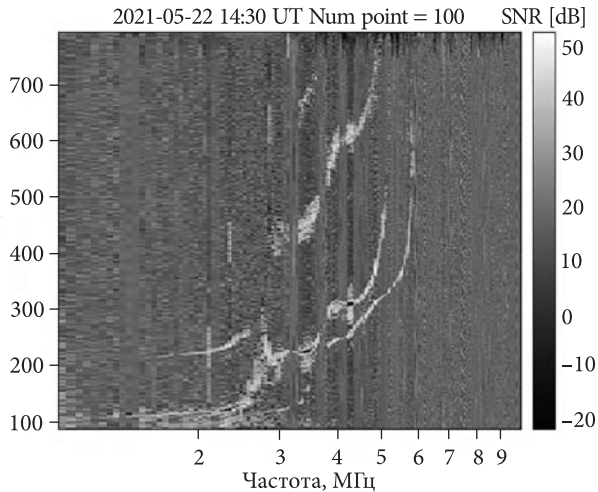


Рис. 2. Одна з іонограм, отриманих на українській обсерваторії іоносферного радіозондування поблизу м. Зміїв 22.05.2021 р.

збуреної іоносфери [9], а також для знаходження варіацій критичної частоти та висоти максимуму шару F2 іоносфери на кінцях геомагнітної трубки [10]. Ця робота надає нові можливості таких досліджень. Основні технічні параметри комплексу наведено в роботі [8]. Робоча смуга частот зондування при цьому становить 1.6...30.0 МГц. Важливим параметром зондування є кількість таких частот. Чим більше, тим вище точність визначення критичних частот іоносферних шарів. Перевага комп'ютерного керування випромінюванням полягає в тому, що воно дозволяє порівняно легко забезпечити роботу різних режимів випромінювання. Тим не менш, все ж таки при цьому неминуче відбувається зростання часу отримання відповідних іонограм. Як приклад відзначимо, що для отримання достатньо докладних іонограм можна використовувати 200 зондуючих частот і 100 кодових посилок на кожній частоті. Тоді час отримання однієї іонограми складатиме близько трьох хвилин. Проте, у представленому експерименті використовувався стандартний цикл отримання іонограм, який дорівнює 15 хв (рис. 2). При проведенні нашого експерименту виявилось зручним те, що один із комплектів такого іонозонду знаходиться та виконує іонозондові вимірювання на обсерваторії Інституту іоносфери Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки України, що розташована поблизу м. Зміїв (Харківська область). Відстань між цією станцією та Радіо-

астрономічною обсерваторією становить близько 46 км (см. рис. 1).

Проводити дослідження частот іоносферного відсічення за допомогою космічного радіовипромінювання на просвіт із використанням українських низькочастотних радіотелескопів УТР-2 та ГУРТ є можливим при умові, якщо частота відсічення нижче 8...9 МГц, що може відбуватися, наприклад, за досить сильної сонячної активності. Зазначимо, що головна вимога таких інструментів до частотного діапазону полягає в тому, щоб мінімізувати вплив іоносфери на результати радіоастрономічних спостережень. Інтерес до побудови антен на нижчих частотах прийшов з іншого напрямку. Останнім часом значно зріс інтерес до проектування можливої антени для проведення наднизькочастотних радіоспостережень космічних об'єктів на зворотному боці Місяця, де знаходиться найбільша радіотиха зона для радіоспостережень із мінімальною кількістю радіоперешкод при майже повній відсутності впливу іоносфери, що дозволяє будувати антени без високої динаміки реєстраторів. [11]. Хоча створення такої антени для реального місячного радіотелескопа є ще далеким від втілення, все ж таки це не зменшує ентузіазм науковців щодо її проектування. Маючи багатий досвід побудови ефективних низькочастотних антен для радіоастрономії [12], нещодавно РІ НАН України також долучився до цієї роботи. Після аналізу сучасних досягнень антенної техніки було запропоновано використовувати для цього задуму активні антени. Під активними антенами маємо на увазі таку побудову антени, в якій вхід підсилювача безпосередньо підключений до клем антенного елемента. У такому випадку підсилювач дозволяє забезпечити хороше узгодження антенного елемента й кабелю, яким сигнал передається на вхід реєструючої апаратури. В результаті вдається досягти високої ефективності прийому слабких космічних сигналів за допомогою антени малих розмірів. Саме з таких антен складається широко відома антенна решітка ГУРТ. Однак її найнижча частота прийому радіовипромінювання становить тільки 8 МГц. Щоб створити подібну антену для проведення спостережень в діапазоні частот 1...40 МГц, необхідно збільшити розміри антени у 1.5–2 рази. Сама антена є схрещеним вібратором

ром складної форми. При таких розмірах можна відмовитися від стійки, на якій кріпляться плечі вібратора, як це було зроблено у решітках ГУРТ, поставивши їх фактично на земну (або місячну в перспективі) поверхню. Як показують розрахунки та натурний експеримент аналізу характеристик антени, такий підхід є цілком виправданим. Більш докладний опис особливостей виконання та апробація даної антени представлені в роботі [13]. Однією з головних проблем під час прийому та аналізу прийнятого космічного радіовипромінювання в земних умовах за допомогою такої антени є велика кількість радіоперешкод, кількість яких особливо велика на частотах 10...15 МГц і нижче. Вказана активна антена може використовуватися спільно з цифровим приймачем ADR (Advanced Digital Receiver) [14], створеним також раніше в РІ НАН України для проведення радіоастрономічних спостережень за допомогою решітки ГУРТ. Це дозволило отримувати реєстрації з високими частотними та часовими роздільними здатностями. Хоча нова активна антена є прототипом антенного елемента решітки місячного низькочастотного радіотелескопа, його застосування є можливим на етапі тестування та в земних умовах. Перші пробні радіоастрономічні випробування такої антени було проведено для сонячних спостережень [15, 16]. Вони показали свою ефективність у дослідженні сонячних радіосплесків на частотах нижче 8 МГц (рис. 3). Слід зазначити, що на отриманих даних явно простежувалося іоносферне відсікання сонячних сплесків III-го типу, а значить, їх можна використовувати як зондуєчий сигнал у дослідженнях критичних частот іоносфери на просвіт. Тому ми вирішили поєднати в одному експерименті обидві можливості, використовуючи як вертикальне зондування іоносфери, так і радіоастрономічні спостереження сонячного радіовипромінювання для визначення змін критичної частоти шару F іоносфери з часом.

2. Експерименти та результат

Проведення спільних спостережень було призначено на 22.05.2021 р. Сонячна активність у цей день супроводжувалася великою кількістю різних за інтенсивністю спалахів класу C (їх було 12 у цей день), які йшли практично один за одним,

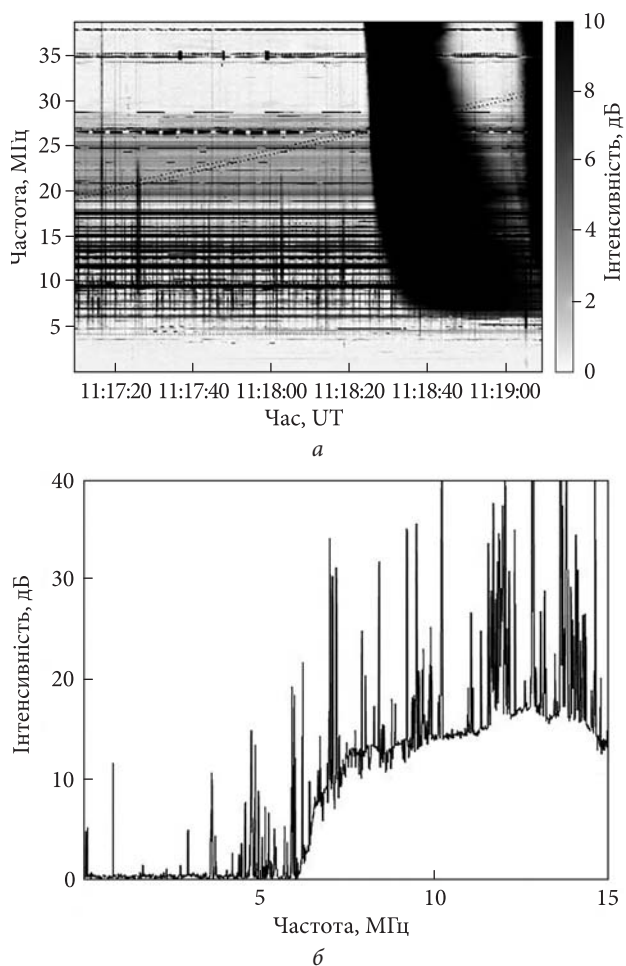


Рис. 3. Приклад однієї з реєстрацій сонячних сплесків III-го типу в радіоастрономічних спостереженнях 22.05.2021 р., прийнятого випромінювання о 11:18:52 UT: динамічний спектр (а) і частотний профіль (б), на якому явно помітно іоносферне відсікання

протягом усього дня. Крім того, у другій половині дня спостерігалися ще два спалахи класу M (<https://solarmonitor.org/?date=20210522>). На сонячному диску в цей час спостерігалася лише одна активна область 12824, яка з'явилася на лімбі Сонця 17 травня. Еволюціонуючи, вона перетворилася з однополярної на біполярну область магнітного класу β - γ саме 22 травня. Рухаючись сонячним лімбом зі сходу на захід, активна область 12824 досягла протилежного краю 30 травня. На 22 травня вона мала геліокоординати N22E11. Це вище за рівень сонячного екватора (<https://www.spaceweatherlive.com/en/solaractivity/region/12824.html>). Тому відразу можна сказати, що якщо використовувати центр Сонця як положення джерела радіовипромінювання, це при-

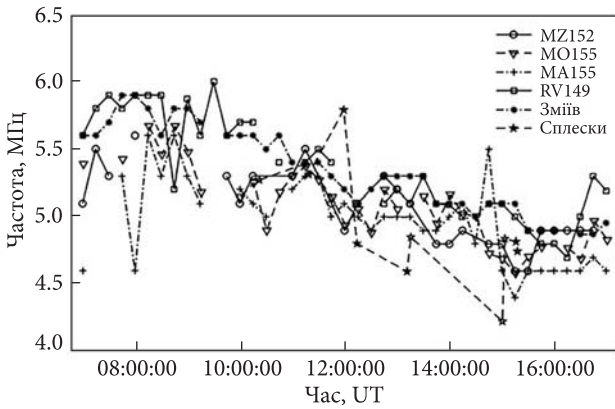


Рис. 4. Результати спільного дослідження критичної частоти шару F2 іоносфери за допомогою іонозондів і радіоастрономічних спостережень сонячних сплесків

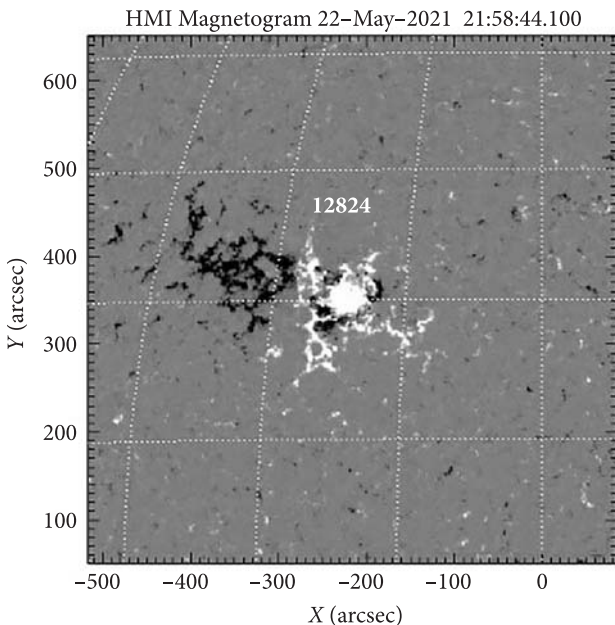


Рис. 5. Сонячна магнітограма активної області 12824 у 2D проекції

зведе до заниження кутової величини істинного його положення, тобто воно буде ближчим до зеніту. Оцінку такої систематичної помилки ми наведемо окремо, трохи нижче. У цей день спостерігалася буря сонячних сплесків III-го типу різної інтенсивності. Наші радіоастрономічні спостереження проводилися з 9:20 до 17:00 UT, а радіозондування з 07:00 до 17:00 UT. Ми обрали 11 потужних сплесків, які було зареєстровано у вказаний час (рис. 3). Оскільки Сонце протягом дня рухалося небесною сферою — положення джерела сонячного радіовипромінювання мало різний кут нахилу до зеніту, який ми враховува-

ли. Справа в тому, що іонозонд визначає критичні частоти іоносферних шарів у вертикальному напрямку. Щоб порівняти наші радіоастрономічні спостереження з даними радіозондування, необхідно перерахувати результат для похилого падіння радіовипромінювання по відношенню до зеніту, до критичної частоти у випадку нормального падіння радіохвилі ($f_{nor_{cr}}$) за формулою $f_{cr} = f_{nor_{cr}} / \cos \psi_1$, де f_{cr} — критична частота, а кут ψ_1 визначається по відношенню до зеніту. Для простоти, за положення джерела можна взяти положення центру оптичного диска Сонця. Знаючи час реєстрації сплеску та зміну координат положення Сонця на небесній сфері, можна знайти кут, під яким падає радіовипромінювання на іоносферу. Але слід зауважити, що такий метод розрахунку критичної частоти є досить грубим, тому що не враховує висоту іоносферного шару та горизонтальні градієнти в іоносфері.

Критичні частоти, які отримують іонозонди поблизу Варшави, Москви та Ростова, у потрібний час можна знайти на сайті GIRO (<https://giro.uml.edu/didbase/>). Іонограми радіозондування з обсерваторії поблизу м. Зміїв (Харківська область) було оброблено нами окремо. З них також вдалося визначити критичні частоти іоносферного шару F протягом 22.05.2021 р. Усі результати для порівняння представлені на рис. 4. Вони показують прийнятну узгодженість між собою.

Окремий інтерес представляє обговорення помилок вимірювань. Якщо бути точними, випромінювання сплесків приходить не з центру Сонця, а з його корони в радіальному напрямку від активної області завдяки електронним пучкам, відповідальним за вказане радіовипромінювання. Тому найпростіший підхід до знаходження кута положення джерела в центрі Сонця дає систематичну помилку (щоправда, дуже невелику, як ми покажемо нижче) на результат обчислення кута рефракції у визначенні частоти іоносферного відсічення в зеніті з радіоастрономічних спостережень. Розглянемо це питання докладно нижче стосовно спостережень 22.05.2021 р. Із цією метою скористаємося порівняно простим підходом, щоб дізнатися, якого порядку буде зазначена помилка та і чи варто її врахувати більш складними методами.

Спочатку визначимо відстань, на якій приблизно виникає випромінювання, що веде до іоносферного відсічення при спостереженні його із Землі. Для цього скористаємося α -кратною моделлю Ньюкірка [15]. Її зручніше записати у вигляді:

$$r = \frac{2.16}{\lg f - 0.26 - 0.5 \lg \alpha'}$$

де f – частота, МГц; $\alpha = 3$, а величина відстані r від центру Сонця виражається в сонячних радіусах. Приймаючи значення частоти 5 МГц, що дуже притаманно іоносферній відсічці, у результаті отримуємо 10.78 радіусів Сонця. Це означає, що у сферичному відношенні сонячна корона на цій частоті в стільки разів буде більшою, ніж видимий розмір радіусу Сонця, кутова величина якого добре відома та становить приблизно 16 кутових хвилин. Далі скористаємося даними сонячного моніторингу (<https://solarmonitor.org/?date=20210522>), щоб отримати зображення активної області 12824 у 2D кутовій шкалі (рис. 5), яка дозволяє нам визначити, як далеко знаходиться активна область від сонячного екватора. У нашому випадку величина становить приблизно 350 кутових секунд. Зауважимо, що верхній край лімба перебуватиме в 960 кутових секундах або в 16 кутових хвилинах, як йому і належить. Незавжди визначити кутовий розмір верхнього краю сонячної сферичної корони на частоті 5 МГц. Він у 10.78 разів вище, тобто близько на 2.87 кутових градусів вище сонячного екватора. Однак положення радіоджерела, пов'язаного з активною областю 12824, буде помітно нижче за цей край:

$$\frac{350 \times 2.87}{960} = 1.05 \text{ (кут. градусів).}$$

Підсумовуючи, можна сказати, що положення джерела сонячних сплесків буде приблизно на один градус вище над горизонтом, ніж при проведенні розрахунку, щодо центру Сонця, найпростішим методом. Положення Сонця над горизонтом протягом спостереження (з 10:20 до 15:20 UT) змінювалося від 60 до 30 градусів. Таким чином, помилка становить не більше 4%, а поблизу зеніту вона ще менша. До цього слід додати одне зауваження. Величина $\alpha = 3$ більш

характерна для метрового та декаметрового діапазонів радіовипромінювання сонячних сплесків. Плазмова частота 5 МГц розташована досить високо в короні, а сама величина α не буде постійною вздовж радіального напрямку від відстаней від сонячної фотосфери і до міжпланетного простору в короні Сонця над активною областю. Ця величина залежить від висоти в короні та зменшуватиметься з віддаленням від фотосфери [17]. І цілком можливо, що вибір $\alpha = 1$ більше відповідатиме реальним висотам в короні для зазначеної плазмової частоти. Якщо провести розрахунки згідно з наведеним вище алгоритмом, ми отримуємо положення радіоджерела вище сонячного екватора на 0.48 кутового градуса, що дає відповідну помилку в порівнянні з визначенням положення джерела по центру Сонця вдвічі менше, ніж у попередньому випадку. Тому результат, отриманий для $\alpha = 3$, можна розглядати як верхню межу оцінки зазначеної систематичної помилки.

Висновки

1. Сучасний розвиток антенної техніки та цифрового прийому дозволяє проводити радіоастрономічні експерименти та спостереження на гранично низьких частотах, майже поблизу частоти іоносферного відсічення. Це надає нам нову важливу інформацію про астрофізичні явища та процеси, а також інформацію про стан навколоземного середовища, зокрема іоносфери.

2. Нові технології у сфері техніки для реєстрації та обробки прийнятого радіовипромінювання дозволяють проводити унікальні експерименти навіть за допомогою невеликих антен, за умови використання високодинамічних реєстраторів. У цій роботі показано одне з таких успішних застосувань для вивчення властивостей іоносфери.

3. Щодо дослідження критичної частоти шару F2 іоносфери 22.05.2021 р. за допомогою двох різних методів, активного (іонозонди) та пасивного (із спостережень низькочастотного сонячного радіовипромінювання на просвіт), цей підхід показав їхню повну узгодженість і успішність.

4. Проста слабоспрямована антена, що приймає випромінювання сонячних сплесків на поверхні Землі та виміряне значення його відсічення, може використовуватися для вимірювання

критичної частоти іоносфери протягом дня не тільки з зенітного напрямку, але й вздовж ефемериди Сонця.

Роботу виконано за підтримки цільової комплексної програми НАН України з наукових кос-

мічних досліджень (Державні реєстраційні номери 0122U002459 і 0122U002460), а також грантів 0121U108635, 0120U100231, 0122U001389, 0122U002576 від НАН України та партнерського проекту P735 (EOARD 1910E0054, STCU) між EOARD, УНТЦ та РІНАНУ.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Reber G. and Ellis G.R.A. Cosmic radio-frequency radiation near one megacycle. *J. Geophys. Res.* 1956. Vol. 61, Iss. 1. P. 1–10.
2. Reber G. Hectometer radio astronomy. *J. Roy. Astron. Soc. Can.* 1994. Vol. 88, Iss. 5. P. 297–302.
3. George M., Orchiston W., Slee B., Wielebinski R. The history of early low frequency radio astronomy in Australia. 2: Tasmania. *J. Astron. Hist. Her.* 2015. Vol. 18, Iss.1. P. 14–22
4. George M., Orchiston W., Wielebinski, R. The history of early low frequency radio astronomy in Australia. 9: the university of Tasmania's Llanherne (Hobart airport) field station during the 1960s–1980s. *J. Astron. Hist. Her.* 2018. Vol. 21, Iss. 1. P. 37–64.
5. Ellis G.R.A. F-region triple splitting. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1953. Vol. 3. P. 263–269.
6. Ellis G.R.A. The Llanherne low frequency radio telescope. *Proc. Astron. Soc. Austr.* 1972. Vol. 2, Iss. 3. P. 135–137.
7. Erickson W.C. The Bruny Island Radio Spectrometer. *Publ. Astron. Soc. Aust.* 1997. Vol. 14, Iss. 3. P. 278–282.
8. Залізовський А.В., Кащев А.С., Кащев С.Б., Колосков А.В., Лисаченко В.Н., Пазнухов В.В., Пикулик І.І., Сопін А.А., Ямпольський Ю.М. Макет портативного когерентного іонозонда. *Космічна наука і технологія.* 2018. Т. 24, № 3. С. 10–22.
9. Живолуп Т.Г., Панасенко С.В., Колосков О.В., Лисаченко В.М. Спільні іонозондові дослідження варіацій критичної частоти шару F2 іоносфери над Харковом і Тромсьо в період осіннього рівнодення за спокійних і збурених умов. *Фізика атмосфери та геокосмосу.* 2021. Т 2, № 1. С. 38–49.
10. Панасенко С.В., Живолуп, Т.Г. Котов Д.В., Колосков О.В., Лисаченко В.М. Одночасні іонозондові дослідження варіацій критичної частоти і висоти максимуму шару F2 іоносфери на обох кінцях геомагнітної трубки. *Фізика атмосфери та геокосмосу.* 2020. Т. 1, № 1. С. 31–44.
11. Shkuratov Y.G., Konovalenko A.A., Zakharenko V.V., Stanislavsky A.A., Bannikova E.Y., Kaydash V.G., Stankevich D.G., Korokhin V.V., Vavriv D.M., Galushko V.G., Yerin S.N., Bubnov I.N., Tokarsky P.L., Ulyanov O.M., Stepkin S.V., Lytvynenko L.N., Yatskiy Y.S., Videen G., Zarka P., Rucker H.O. A twofold mission to the moon: Objectives and payloads. *Acta Astronaut.* 2019. Vol. 154. P. 214–226.
12. Konovalenko A., Sodin L., Zakharenko V., Zarka P., Ulyanov O., Sidorchuk M., Stepkin S., Tokarsky P., Melnik V., Kalinichenko N., Stanislavsky A., Koliadin V., Shepelev V., Dorovskyy V., Ryabov V., Koval A., Bubnov I., Yerin S., Gridin, A. Kulishenko V., Reznichenko A., Bortsov V., Lisachenko V., Reznik A., Kvasov G., Mukha D., Litvinenko G., Khristenko A., Shevchenko V.V., Shevchenko V.A., Belov A., Rudavin E., Vasylieva I., Miroshnichenko A., Vasilenko N., Olyak M., Mylostna K., Skoryk A., Shevtsova A., Plakhov M., Kravtsov I., Volvach Y., Lytvinenko O., Shevchuk N., Zhouk I., Bovkun V., Antonov A., Vavriv D., Vinogradov V., Kozhin R., Kravtsov A., Bulakh E., Kuzin A., Vasilyev A., 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., Griefmeier 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.
13. Бубнов І.М., Коноваленко О.О., Токарський П.Л., Корольов О.М., Єрін С.М., Станіславський Л.О. Створення та апробація низькочастотної радіоастрономічної антени для досліджень об'єктів Всесвіту зі зворотного боку Місяця. *Радіофізика і радіоастрономія.* 2021. Т 26, № 3. С. 197–210.
14. Zakharenko V., Konovalenko A., Zarka P., Ulyanov O., Sidorchuk M., Stepkin, Koliadin V., Kalinichenko N., Stanislavsky A., Dorovskyy V., Shepelev V., Bubnov I., Yerin S., Melnik V., Koval A., Shevchuk N.S., Vasylieva I., Mylostna K., Shevtsova A., Skoryk A., Kravtsov I., Volvach Y., Plakhov M., Vasilenko N., Vasylykivskyi 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., Griefmeier J.-M. Digital Receivers for Low-Frequency Radio Telescopes UTR-2, URAN, GURT. *J. Astron. Instrum.* 2016. Vol. 5, Iss. 4, id. 1641010.
15. Stanislavsky L.A., Bubnov I.N., Konovalenko A.A., Tokarsky P.L., Yerin S.N. The first detection of the solar U+III association with an antenna prototype for the future lunar observatory. *Res. Astron. Astrophys.* 2021. Vol. 21, Iss. 8, id. 187.
16. Bubnov I.N., Stanislavsky L.A., Yerin S.N. Simultaneous observations of solar radio bursts with Ukrainian radiotelescopes and by Parker Solar Probe during its encounter. *Proc. 13th Workshop "Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere".* Primorsko, Bulgaria, 13–17 Sept. 2021, pp. 14–19.
17. Mann G., Breiting F., Vocks C., Aurass H., Steinmetz M., Strassmeier K.G., Bisi M.M., Fallows R.A., Gallagher P., Kerdraon A., Mackinnon A., Magdalenic J., Rucker H., Anderson J., Asgekar A., Avruch I.M., Bell M.E., Bentum M.J., Bernardi G., Best P., Birzan L., Bonafede A., Broderick J.W., Brüggem M., Butcher H.R., Ciardi B., Corstanje A., de Gasperin F., de Geus E., Deller A., Duscha S., Eislöffel J., Engels D., Falcke H., Fender R., Ferrari C., Frieswijk W., Garrett M.A., Griefmeier J., Gunst A.W., van Haarlem M., Hassall T.E., Heald G., Hessels J.W.T., Hoefft M., Hörandel J., Horneffer A., Juette E., Karastergiou A., Klijn W.F.A., Kondratiev V.I.,

Kramer M., Kuniyoshi M., Kuper G., Maat P., Markoff S., McFadden R., McKay-Bukowski D., McKean J.P., Mulcahy D.D., Munk H., Nelles A., Norden M.J., Orru E., Paas H., Pandey-Pommier M., Pandey V.N., Pizzo R., Polatidis A.G., Rafferty D., Reich W., Röttgering H., Scaife A.M.M., Schwarz D.J., Serylak M., Sluman J., Smirnov O., Stappers B.W., Tagger M., Tang Y., Tasse C., ter Veer S., Thoudam S., Toribio M.C., Vermeulen R., van Weeren R.J., Wise M.W., Wucknitz O., Yatawatta S., Zarka P. and Zensus J.A. Tracking of an electron beam through the solar corona with LOFAR. *Astron. Astrophys.* 2018. Vol. 611, id.A57, 9 pp.

Стаття надійшла 21.11.2021

REFERENCES

1. Reber, G. and Ellis, G.R.A., 1956. Cosmic radio-frequency radiation near one megacycle. *J. Geophys. Res.*, **61**(1), pp. 1–10.
2. Reber, G., 1994. Hectometer radio astronomy. *J. Roy. Astron. Soc. Can.*, **88**(5), pp. 297–302.
3. George, M., Orchiston, W., Slee, B., Wielebinski, R., 2015. The history of early low frequency radio astronomy in Australia. 2: Tasmania. *J. Astron. Hist. Her.*, **18**(1), pp. 14–22.
4. George, M., Orchiston, W., Wielebinski, R., 2018. The history of early low frequency radio astronomy in Australia. 9: the university of Tasmania's Llanherne (Hobart airport) field station during the 1960s–1980s. *J. Astron. Hist. Her.*, **21**(1), pp. 37–64.
5. Ellis, G.R.A., 1953. F-region triple splitting. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **3**, pp. 263–269.
6. Ellis, G.R.A., 1972. The Llanherne low frequency radio telescope. *Proc. Astron. Soc. Austr.*, **2**(2), pp. 135–137.
7. Erickson, W.C., 1997. The Bruny Island Radio Spectrometer. *Publ. Astron. Soc. Austr.*, **14**(3), pp. 78–282.
8. Zalizovsky, A.V., Kashcheev, A.S., Kashcheev, S.B., Koloskov, A.V., Lisachenko, V.N., Paznukhov, V.V., Pikulik, I.I., Sopin, A.A., Yampolsky, Yu.M., 2018. Model of a portable coherent ionosonde. *Space Science and Technology*, **24**(3), pp. 10–22 (in Russian).
9. Zhivolup T.G., Panasenko, S.V., Koloskov, O.V., Lisachenko, V.M., 2021. Joint ionosonde studies of variations in the critical frequency of the F2 ionosphere layer over Kharkiv and Tromsø during the autumn equinox under calm and turbulent conditions. *Atmos. Phys. Geospace*, **2**(1), pp. 38–49 (in Ukrainian).
10. Panasenko, S.V., Zhivolup, T.G., Kotov, D.V., Koloskov, O.V., Lisachenko, V.M., 2020. One-hour ionosonde study of variations in the critical frequency and height of the F2 ionospheric maximum at both ends of the geomagnetic tube. *Atmos. Phys. Geospace*, **1**(1), pp. 31–44 (in Ukrainian).
11. Shkuratov, Y.G., Konovalenko, A.A., Zakharenko, V.V., Stanislavsky, A.A., Bannikova, E.Y., Kaydash, V.G., Stankevich, D.G., Korokhin, V.V., Vavriv, D.M., Galushko, V.G., Yerin, S.N., Bubnov, I.N., Tokarsky, P.L., Ulyanov, O.M., Stepkin, S.V., Lytvynenko, L.N., Yatskiv, Y.S., Videen, G., Zarka, P., Rucker, H.O., 2019. A twofold mission to the moon: Objectives and payloads. *Acta Astronaut.*, **154**, pp. 214–226.
12. Konovalenko, A., Sodin, L., Zakharenko, V., Zarka, P., Ulyanov, O., Sidorchuk, M., Stepkin, S., Tokarsky, P., Melnik, V., Kalinichenko, N., Stanislavsky, A., Koliadin, V., Shepelev, V., Dorovskyy, V., Ryabov, V., Koval, A., Bubnov, I., Yerin, S., Gridin, A., Kulishenko, V., Reznichenko, A., Bortsov, V., Lisachenko, V., Reznik, A., Kvasov, G., Mukha, D., Litvinenko, G., Khristenko, A., Shevchenko, V.V., Shevchenko, V.A., Belov, A., Rudavin, E., Vasylieva, I., Miroshnichenko, A., Vasilenko, N., Olyak, M., Mylostna, K., Skoryk, A., Shevtsova, A., Plakhov, M., Kravtsov, I., Volvach, Y., Lytvynenko, O., Shevchuk, N., Zhouk, I., Bovkun, V., Antonov, A., Vavriv, D., Vinogradov, V., Kozhin, R., Kravtsov, A., Bulakh, E., Kuzin, A., Vasilyev, A., 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., Griefmeier, 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.
13. Bubnov, I.M., Konovalenko, O.O., Tokarsky, P.L., Korolev, O.M., Erin, S.M., Stanislavsky, L.O., 2021. Creation and approbation of a low-frequency radio astronomy antenna for studies of objects of the Universe from the Moon's farside. *Radio Phys. Radio Astron.*, **26**(3), pp. 197–210 (in Ukrainian).
14. 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.S., Vasylieva, I., Mylostna, K., Shevtsova, A., Skoryk, A., Kravtsov, I., Volvach, Y., Plakhov, M., Vasilenko, N., Vasylykivskyi, 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., Griefmeier, J.-M., 2016. Digital Receivers for Low-Frequency Radio Telescopes UTR-2, URAN, GURT. *J. Astron. Instrum.*, **5**(4), id. 1641010.
15. Stanislavsky, L.A., Bubnov, I.N., Konovalenko, A.A., Tokarsky, P.L., Yerin, S.N., 2021. The first detection of the solar U+III association with an antenna prototype for the future lunar observatory. *Res. Astron. Astrophys.*, **21**(8), id. 187.
16. Bubnov, I.N., Stanislavsky, L.A., Yerin, S.N., 2021. Simultaneous observations of solar radio bursts with Ukrainian radiotelescopes and by Parker Solar Probe during its encounter. In: *Proc. 13th Workshop "Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere"* Primorsko, Bulgaria, 13–17 Sept. 2021, pp. 14–19.
17. Mann, G., Breitling, F., Vocks, C., Aurass, H., Steinmetz, M., Strassmeier, K.G., Bisi, M.M., Fallows, R.A., Gallagher, P., Kerdraon, A., Mackinnon, A., Magdalenic, J., Rucker, H., Anderson, J., Asgekar, A., Avruch, I.M., Bell, M.E., Bentum, M.J., Bernardi, G., Best, P., Birzan, L., Bonafede, A., Broderick, J.W., Brügggen, M., Butcher, H.R., Ciardi, B., Corstanje, A., de Gasperin, F., de Geus, E., Deller, A., Duscha, S., Eisloffel, J., Engels, D., Falcke, H., Fender, R., Ferrari, C., Frieswijk, W., Garrett, M.A., Griefmeier, J., Gunst, A.W., van Haarlem, M., Hassall, T.E., Heald, G., Hessels, J.W.T., Hoefl, M., Hörandel, J., Horneffer, A., Juette, E., Karastergiou, A., Klijn, W.F.A., Kondratiev, V.I., Kramer, M., Kuniyoshi, M., Kuper, G., Maat, P., Markoff, S., McFadden, R., McKay-Bukowski, D., McKean, J.P., Mulcahy, D.D., Munk, H., Nelles, A., Norden, M.J., Orru, E., Paas, H., Pandey-Pommier, M., Pandey, V.N., Pizzo,

R., Polatidis, A.G., Rafferty, D., Reich, W., Röttgering, H., Scaife, A.M.M., Schwarz, D.J., Serylak, M., Sluman, J., Smirnov, O., Stappers, B.W., Tagger, M., Tang, Y., Tasse, C., ter Veen, S., Thoudam, S., Toribio, M.C., Vermeulen, R., van Weeren, R.J., Wise, M.W., Wucknitz, O., Yatawatta, S., Zarka, P. and Zensus, J.A., 2018. Tracking of an electron beam through the solar corona with LOFAR. *Astron. Astrophys.*, **611**, id.A57, 9 pp.

Received 21.11.2021

L.O. Stanislavsky¹, I.M. Bubnov¹,
S.M. Yerin^{1,2}, A.V. Zalizovski^{1,3,4}, and V.M. Lisachenko¹

¹ Institute of Radio Astronomy of the National Academy of Sciences of Ukraine

4, Mystetstv St., Kharkiv, 61002, Ukraine

E-mail: lev.stanislavskiy@gmail.com

² V.N. Karazin Kharkiv National University

6, Nezalezhnosti ave., Kharkiv, 61000, Ukraine

³ Space Research Centre of the Polish Academy of Sciences

18A, Bartycka St., 00-716, Warsaw, Poland

⁴ National Antarctic Science Centre

16, Tarasa Shevchenko Boulevard, Kyiv, 01601, Ukraine

THE CRITICAL FREQUENCY OF THE IONOSPHERIC F2-LAYER AS OBTAINED FROM IONOSONDE DATA AND OBSERVATIONS OF SOLAR RADIO BURSTS

Subject and Purpose. Studying the time variations shown by the critical frequencies of the ionospheric F2 layer through comparative analysis of ionosonde data and observations of type III solar radio bursts.

Methods and Methodology. In this work, two independent methods have been used for identifying critical frequencies in the ionosphere, namely that of vertical sounding and observations of type III solar radio bursts near their cut-off frequency in the ionosphere. One of the ionosondes used for vertical sounding was located near Zmiiv (Kharkiv Region), rather close to the UTR-2 radio astronomy observatory where the solar bursts were observed. The radiation from such bursts represented probe signals for transmissive sounding. The solar radiation was received with an element of a low-frequency (1 to 40 MHz) antenna array.

Results. On May 22, 2021 variations in the critical frequency f_0F2 of the ionospheric F2-layer were followed between 07:00 and 17:00 UT. The value reached a maximum of 5.9 MHz at 07:45 to 08:00 UT and then decreased smoothly to 4.9 MHz, staying there from 15:30 till 16:45 UT. At that time, a storm of type III solar bursts was recorded with the antenna for radio observations at 1...40 MHz, revealing a cut-off effect for the bursts. As has been found, their cut-off frequency can be used for estimating the critical frequency f_0F2 in the ionosphere.

Conclusions. The comparative analysis of solar burst observations and frequency-and-time measurements with an ionosonde has shown possibilities for evaluating the critical frequency f_0F2 in the ionosphere from the data on the cut-off frequency for solar radio-frequency burst radiation.

Keywords: ionosphere, F2-layer, ionosonde measurements, radio astronomical observations, solar bursts, cut-off frequency.