УДК 523.164:42 № держреєстрації 0116U002841 Інв. №

# НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ РАДІОАСТРОНОМІЧНИЙ ІНСТИТУТ (РІ НАНУ) 61002, г. Харків - 2, вул. Мистецтв, 4 тел. (0572) 706-14-15



### **3BIT**

### ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ

# Скоординовані синхронні дослідження об'єктів сонячної системи методами наземно-космічної низькочастотної радіоастрономії. Комплексні дослідження геоефективних проявів сонячної активності. (шифр "Сансі")

Науковий керівник НДР провідний науковий співробітник, д.ф.-м.н., с.н.с.

В.В. Захаренко

Харків – 2016

Звіт про виконання наукового проекту схвалено на засіданні вченої ради Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України (Протокол № 12 від 30 листопада 2016 р.)

# СПИСОК ВИКОНАВЦІВ

# НДР "Скоординовані синхронні дослідження об'єктів сонячної системи

методами наземно-космічної низькочастотної радіоастрономії.

Комплексні дослідження геоефективних проявів сонячної активності."

(шифр "Сансі")

Керівник НДР, п.н.с.,	В.В. Захаренко	Ma
д. фм. н., с.н.с.		40 1
завідуючий відділенням,	О.О. Коноваленко	
академік НАН України	1.4.9.	The
д. фм. н. с.н.с.		4 V
Відповідальний виконавець,	О.О. Станіславський	
п.н.с., д. фм. н., с.н.с.		All
С.Н.С.,	О.М. Ульянов	1 stal
к. фм. н., с.н.с.		Lon 1-
завідуючий відділом,	М.М. Калініченко	
д. фм. н., с.н.с.		them? -
аспірант	Я.С. Вольвач	Bary

Підписи виконавців НДР завіряю Вчений секретар РІ НАНУ, к.ф.-м.н



Удовенко А.П.

# 3MICT

Перелік умовних позначень Реферат ВСТУП РОЗДІЛ 1. ДОСЛІДЖЕННЯ ВИПРОМІНЮВАННЯ ЮПІТЕРА НА РАДІОТЕЛЕСКОПАХ УТР-2. УРАН. БУРТ СИНХРОННО З МІСІЄЮ	4 5 7 9
IIINO	
1.1. Розробка форматів метаданих та приєднання до європейського сервісу обміну астрономічними ланими VESPA	11
1.2. Одночасні спостереження антенами метрового та декаметрового діапазону радіовипромінювання Юпітера	16
1.3. Виявлення нових типів випромінювання	18
1.4. Верхня оцінка міри розсіювання в міжпланетному середовищі	23
1.5. Використання інтерферометра з короткою базою при реєстрації	28
радіовипромінювання Юпітера	
1.6. Висновки до розділу	32
РОЗДІЛ 2. ГЕЛІОГРАФІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СТАЦІОНАРНИХ СПЛЕСКІВ	35
IV ТИПУ	
2.1. Інструменти і методологія отримання декаметрових зображень	37
2.2 Спостереження і аналіз даних	40
2.3. Обговорення отриманих результатів	51
2.4. Висновки до розділу	53
РОЗДІЛ З. ДОСЛІДЖЕННЯ РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ БЛИСКАВОК В АТМОСФЕРІ САТУРНА	58
3.1. Гігантський шторм на Сатурні	58
3.2. Апаратура і спостереження	58
3.3. Створення каталогу блискавок і визначення їх параметрів	63
3.4. Висновки до розділу	68
РОЗДІЛ 4. КОМПЛЕКСНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СОНЯЧНОГО ВІТРУ ТА ГЕОЕФЕКТИВНИХ ПРОЯВІВ СОНЯЧНОЇ АКТИВНОСТІ	71
4.1. Методика встановлення потокової структури сонячного вітру за	71
орбітою Землі	
4.2. Комплексні дослідження геоефективних проявів сонячної	76
активності	
4.3. Висновки до розділу	80
ВИСНОВКИ	82
Публікації за темою НДР	85

# ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

STEREO	- Solar Terrestrial Relations Observatory;
DSPZ	- digital spectro-polarimeter type Z;
FFT	- fast Fourier transform
SOHO	- Solar and Heliospheric Observatory;
АЦП	- аналогово-цифровий перетворювач
AO	- активна область (на лімбі Сонця)
ГУРТ	- Гігантський Український Радіо Телескоп
ДС	- діаграма спрямованості;
КА	- космічний апарат,
КВМ	- корональний викид маси;
С.О.П.	- сонячні одиниці потоку.
УРАН	- Український Радіоінтерферометр Академії Наук
УТР-2	- Український Т-подібний Радіотелескоп 2-ї модифікації
ЧРЗ	- часова роздільна здатність

#### ΡΕΦΕΡΑΤ

Звіт про НДР: 88 с., 34 рис., 2 табл., 69 джерел, 6 статей в реферованих журналах та 9 доповідей на міжнародних конференціях за 2016 р. і 10 статей в реферованих журналах та 5 доповідей на міжнародних конференціях за 2014-2015 р.р. – всього 30 публікацій за темою НДР.

Об'єкт дослідження – Сонце, планети, сонячний вітер, іоносфера Землі.

Мета роботи: багатоантенні дослідження джерел низькочастотного випромінювання об'єктів Сонячної системи, а саме: блискавок в атмосфері Сатурна, системи Юпітера з супутниками, викидів корональних мас Сонця та мерехтінь на сонячному вітрі для виявлення фізичних характеристик процесів, що породжують це випромінювання, а також забезпечують зв'язок між сонячною короною, сонячним вітром та іоносферою Землі.

Задачі досліджень включають в себе:

• дослідження випромінювання Юпітера на радіотелескопах УТР-2, УРАН, ГУРТ синхронно з місією Juno,

• геліографічні та спектральні дослідження сонячних стаціонарних сплесків IV типу,

• дослідження радіовипромінювання блискавок в атмосфері Сатурна

• комплексні дослідження сонячного вітру та геоефективних проявів сонячної активності.

Основні результати НДР наступні.

Ключовою відмінністю презентованих досліджень об'єктів Сонячної системи було використання багатоантенних спостережень. Використання наземних радіотелескопів і космічних апаратів дозволяють розділити сигнали радіозавад, вплив мерехтінь і досліджуване випромінювання з найвищим із досягнутих на даний момент рівнем надійності. Це дозволяє зробити наступні кроки в напрямку пошуку нових астрономічних ефектів, їх фізичної інтерпретації та побудови більш достовірних моделей космічних об'єктів. Так, багатоантенні спостереження радіовипромінювання Юпітера дозволили виділити нові риси і, навіть, типи випромінювання. Особливу цінність мають отримані спостережні дані, записані синхронно з КА Джуно і багатьма різноманітними телескопами світу. Зроблені оцінки міри розсіювання в міжпланетній плазмі. Верхня межа цього параметра в декаметровому діапазоні (0.01 мкс) дозволяють досліджувати найкоротші деталі радіовипромінювання джерел Сонячної системи. Розроблено алгоритм оцінки відносних флуктуацій коефіцієнта заломлення поблизу джерел радіовипромінювання Сонячної системи таких, як Юпітер, Сатурн, Сонце. На основі одночасних спостережень радіотелескопів/геліографів від декаметрового до дециметрового діапазону були проведені геліографічні та спектральні дослідження коронального викиду мас і сплесків радіовипромінювання IVs типу. Вперше зареєстровані субмілісекундна і мікросекундна структури блискавок в атмосфері Сатурна. Отримані характеристики електростатичних розрядів під час гігантського шторму. Створено методику встановлення потокової структури сонячного вітру за орбітою Землі. Різниця в параметрах потоків міжпланетної плазми може бути використана для досліджень корональних викидів мас та надає важливу інформацію для прогнозу космічної погоди. На основі експериментальних даних синхронного моніторингу декаметрової компоненти спорадичного радіовипромінювання Сонця, атмосферного інфразвуку та електричного поля, а також доступних геомагнітних даних і даних про сонячну активність в інших діапазонах отримані нові результати стосовно сонячно-земних зв'язків.

Ключові слова: S-сплеск, блискавка, корональний викид маси, сонячний вітер, мерехтіння, магнітне поле.

#### ВСТУП

Освоєння космосу, насамперед ближнього, потребує глибокого вивчення процесів, які відбуваються в Сонячній системі. Так, вивчення блискавок в атмосфері Сатурна дозволяє знаходити загальні риси та глибокі зв'язки з подібними явищами на Землі, що дозволяє краще зрозуміти процеси в атмосфері та іоносфері Землі. Дослідження та спостереження на постійній основі корональних викидів мас необхідно для передбачення космічної погоди, а вивчення умов та механізмів S-випромінювання Юпітера дозволяє передбачати та проводити пошук подібного випромінювання найближчих екзопланет.

Найбільший у світі низькочастотний радіотелескоп УТР-2 з ефективною площею близько 150 тис. кв. метрів [1.1] та найбільша мережа низькочастотних радіотелескопів [1.2] є найефективнішою групою астрономічних інструментів для досліджень в декаметровому діапазоні довжин хвиль. Об'єднання радіотелескопів в єдину мережу дозволяє отримати нову якість досліджень. Так, розширення смуги частот з 33 до 80 МГц завдяки додаванню все нових секцій радіотелескопу ГУРТ при дослідженні випромінювання Сонця і планет дозволяє фіксувати та вимірювати набагато більший набір сплесків. Це дозволяє вимірювати такі характеристики, як спектр, частотний дрейф, ширину смуги випромінювання та ін. набагато точніше і детальніше. А це, в свою чергу, дозволя€ отримувати параметри і характеристики процесів, шо породжують випромінювання, з набагато меншими похибками. В підсумку, це дає змогу будувати кращі теоретичні моделі та перевіряти зроблені на їх основі передбачення.

Розташовані на відстанях в сотні кілометрів [1.2] радіотелескопи системи УРАН знаходяться під впливом місцевих широкосмугових радіозавад. Умови поширення крізь земну іоносферу в різних місцях земної кулі є різними. Це дозволяє легко виділяти завади по потужності, спектру та особливостям діаграм спрямованості (ДС) антен. А вплив мерехтінь на місцевих неоднорідностях земної іоносфери дає неоднаковий рівень модуляції випромінювання точкових джерел, що потрапляють в діаграму спрямованості радіотелескопів. Таким чином, кореляційна обробка даних різних радіотелескопів, інтерферометру використання режиму та аналіз спектральних особливостей радіовипромінювання на різних антенах дозволяє виділити саме ті риси, які притаманні суто випромінюванню космічних джерел.

Даний звіт присвячений результатам робіт, виконаних за договором "Скоординовані синхронні дослідження об'єктів сонячної системи методами наземнокосмічної низькочастотної радіоастрономії. Комплексні дослідження геоефективних проявів сонячної активності." від 01.03.2016 в рамках Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2012-2016 рр. та розпорядженням Президії НАН України від 25.02.16 № 119.

# РОЗДІЛ 1. ДОСЛІДЖЕННЯ ВИПРОМІНЮВАННЯ ЮПІТЕРА НА РАДІОТЕЛЕСКОПАХ УТР-2, УРАН, ГУРТ СИНХРОННО З МІСІЄЮ JUNO.

В 2016 році були проведені перші синхронні спостереження радіовипромінювання Юпітера наземними телескопами УТР-2, УРАН, ГУРТ (Україна) [1.2], NDA [1.3], NenuFAR [1.4] (Франція), LWA1 [1.5] (США) та космічним апаратом (КА) Juno в моменти максимального наближення (< 5000 км) його до поверхні Юпітера. Завдяки цій обставині, а також тому, що орбіта КА проходить крізь токові трубки (що породжують декаметрове випромінювання) супутників Іо та Ганімеда дані синхронних спостережень матимуть унікальну наукову цінність. Всі моменти максимального наближення КА до Юпітера (perijove – РЈ) використовуються наземними радіо- й оптичними радіотелескопами для одночасних спостережень з різноманітними науковими інструментами КА (оптичні та інфрачервоні камери, низькочастотні радіоприймачі, детектори частинок, тощо). Багатоантенні низькочастотні спостереження на рознесених у просторі телескопах забезпечують набагато кращі результати з огляду подолання негативного впливу місцевих радіозавад і неоднорідностей земної іоносфери.

В поточному році були не тільки проведені три основних та декілька підготовчих сесій спостережень (тільки наземними радіотелескопами), але завдяки співпраці з Паризькою обсерваторією (Франція) та Університетом майбутнього м. Хакодате (Японія) був створений сервер, на якому сформовано архів даних спостережень УТР-2, УРАН, ГУРТ, що включено в потужну європейську базу VESPA (Virtual European Solar and Planetary Access).

Крім того, наземні багатоантенні спостереження дозволили відкрити нові особливості коротких сплесків радіовипромінювання Юпітера, характерна тривалість яких складає одиниці мілісекунд.

Дослідження радіовипромінювання Юпітера на радіотелескопах УТР-2, УРАН та ГУРТ ведеться вже багато років. Але початок роботи місії Джуно (Juno) дав старт об'єднанню всіх телескопів підтримки місії (радіо, інфрачервоні, ультрафіолетові на КА та інші) в єдину мережу по вивченню в найбільших подробицях механізмів, що породжують випромінювання Юпітера і його супутників в широкому діапазоні частот та інші фізичні явища в магнітосфері та іоносфері Юпітера. На рис.1.1 наведено частину траєкторії космічного апарату, який має полярну орбіту та пролітає на якомога більш далекій відстані від радіаційних поясів, але дуже близько від поверхні.



JunoCam

3.

4.

### Комплекс досліджень полярної магнітосфери (Polar Magnetosphere Suite)

Дослідження полярної магнітосфери вимагає вимірювання:

1. Електричних струмів вздовж силових ліній магнітного поля.

2. Електромагнітних випромінювань, що пов'язані з аврорами і електростатичними хвилями.

3. Розподілу частинок по енергіям та розподілу магнитосферної плазми

4. Ультрафіолетового аврорального випромінювання

Для отримання цих даних космічний апарат несе чотири окремі інструменти, призначені для забезпечення спостереження:

- 1. Jovian Aurora Distribution Experiment (JADE)
- 2. Energetic Particle Detector (JEDI)
  - Радіо-спектроаналізатор (0.01-40 МГц) WAVES
    - UV spectrograph (UVS)



Рис. 1.1. Реєструюча апаратура Джуно та схема прольоту космічного апарату.

Це стає можливим, якщо штучний супутник Юпітера буде влітати під потужні радіаційні пояси крізь області біля полярної шапки планети. Але саме тут замикаються струми трубок Іо та Ганімеда (точка контакту з планетою має назву «п'яти» відповідної

трубки), які породжують потужне радіовипромінювання, верхня частота якого визначається максимальним магнітним полем в точці контакту (~40 МГц). Тобто, практично весь спектр лежить в декаметровому діапазоні.

На нижній панелі рис.1.1 наведено відрізок траєкторії та полярний овал з найбільшими точками розігріву поверхні планети, які позначають відповідні місці контакту (п'яти трубок Іо та Ганімеда) струмів. Реєструюча апаратура на Джуно (рис. 1.1) складається зі штирової антени з однією лінійною поляризацією та радіоспектрометра WAVES, який працює в широкому діапазоні частот (0.01-40 МГц). Принцип роботі спектрометра – послідовно-паралельний. З заданою послідовністю центральна частота цифрового приймача настроюється на якусь центральну частоту в заданому інтервалі та веде оцифровку смуги шириною 3 МГц. Повний цикл запису 40 МГц складає від 30 секунд до декількох хвилин. Спектрометр має змогу он-лайн обчислювання швидкого перетворення Фур'є (Fast Fourier Transform – FFT). Рішення про передачу спектрів або відліків АЦП на Землю приймає оператор КА.

Особливо значущим є те, що за останні роки були здійснені відкриття нових типів випромінювання системи Юпітера з супутниками, які роблять необхідним подальші теоретичні і спостережні роботи для побудови моделі радіовипромінювання планети. В даному розділі наведено опис сервісу обміну науковими даними, результати одночасних спостережень і нові спостережні результати, які потребують більш глибокого вивчення на основі аналізу даних в якнайширшому діапазоні довжин хвиль.

# 1.1. Розробка форматів метаданих та приєднання до європейського сервісу обміну астрономічними даними VESPA.

Співпраця з іншими радіотелескопами світу та інструментами, побудованими на інакших принципах отримання даних (оптичні камери, вимірювачі магнітних полів, тощо) потребує більш загального визначення даних, отриманих за результатами спостережень. Ця робота в обсерваторіях світу ведеться вже десятки років. Завдяки співпраці з європейськими колегами ми приєднались до потужної європейської (за розробкою) системи узагальнення даних та сервісу надання користувачам загального доступу VESPA. Сервіс забезпечує доступ до даних вимірювальних пристроїв космічних апаратів, радіотелескопів, наземних сервісів астрономічних даних та моделей різноманітних об'єктів та середовищ (наприклад, модель магнітного поля Юпітера), які дозволяють досліджувати астрономічні явища в якомога ширшому колі проявів.

Для використання даних спостережень планет та Сонці було зареєстровано необхідний набір імен серверів та адрес (табл. 1.1).

my_servername	Server-UTR2-Juno	voparis-test-bc
my_domain	rian.kharkov.ua	obspm.fr
maintainer_email (1)	utr2.uran.gurt.data@gmail.com	vo.paris@obspm.fr
authority-ivo-name (2)	UTR-2.IRA	vopdc.obspm
server_title	UTR-URAN-GURT-data	My new test DaCHS server
my_user	user, user1	user

Таблиця. 1.1. Адресі та назви серверів з даними.

Для опису файлів з даними спостережень на приймачах радіотелескопів УТР-2 УРАН і ГУРТ були розроблені так звані таблиці метаданих з описом змінних та діапазонів їх варіацій, які необхідні для опису представленого типу результатів спостережень. З можливих кількох десятків параметрів, розроблених VESPA для різноманітних приймальних систем, були обрані ті, що повністю описують характер даних (назва телескопу, номер променю, ідентифікатор приймача, режим запису – спектри, відліки АЦП, кореляція), час старту та фінішу, місце знаходження та роздільну здатність. Опис кожного файлу (метадані) має 33 поля, які наведені в таблиці 1.2. Для пояснення в таблиці вказано назви змінних, типи даних (в термінах SQL), формати, можливі значення, визначення та приклади.

Таблиця.1.2. Визначення параметрів метаданих (опису змінних в файлі даних) (https://voparis-confluence.obspm.fr/display/VES/EPN-TAP+V2.0+parameters)

N⁰	Назва змінної	Тип	Формат і можливі значення	Визначення та
		(SQL)	(? – довільне значення в цій позиції)	приклад
1	granule_uid	Text	Назва файлу	Назва файлу (.adr, .jds) 20160501_120000.j ds
2	granule_gid	Text	5char – назва телескопу (UTR-2, GURT1, URAN1URAN4) + 2char номер променю (b01b05b99) – для URAN завжди "b1" + 2char – ідентифікатор приймача (rArDrZ) + 2char – режим (SP, WF, CR) спектри, відліки АЦП, кореляція	Групується за назвою радіотелескопу променя, приймача, режиму <i>UTR-2_b03_rD_SP</i>

			всі поля розділені ""	
3	obs id	Text	8char Дата спостережень	20160501_120000_
	_		[+6char час початку	230000_Jupiter
			+6char час зупинки	20160501_070123_
			+?char of'ext]	081212_Saturn
			всі поля розділені ""	
4	dataproduct type	Text	2char Організація вихілних ланих в	Standard:
			нумерованому списку	<i>ds</i> = dynamic
				spectrum
				ts = time series
5	torgot nomo	Toyt	2 char	(wavelofili)
5	target_name	Техі		Saturn
				Uranus
6	target_class	Text	?char Тип об'єкту з нумерованого	Planet
			списку	Stat
				Interplanetary
7	time min	double	Час старту в Юдіанських днях ЦТС	2457628.0234606
<i>'</i>	unic_inin	double		
8	time_max	double	-//- фінішу -//-	2457628.0248495
9	time exp max	double	Час накопичення, секунли	0.02
1	spectral range min	double	Стартова частота. Ги	8×10 <sup>6</sup>
0	-r			
1	spectral range max	double	Фінішна частота Ги	33×10 <sup>6</sup>
1	-r			
1	spectral resolution m	double	спектральна розлільна златність. Ги	4×10 <sup>3</sup>
2	ax		······································	
1	instrument host nam	Text	Стандартна назва радіотелескопу	UTR-2
3	e – –			GURT
1	•	<b>T</b> (		URAN1URAN4
	instrument_name	Text	Стандартна назва інструменту	AEZ
4		<b>T</b> (	(приимача)	<b>.</b>
	measurement_type	Text	визначення даних (спектри, кореляція,	sp, cr, wj
5		T	відліки АЦП)	2
I	processing_level	Integer	СОДМАС рівень каліорування	2
6			(Committee on Data Management and	
_		D.	Computation" calibration level)	2016.00
	creation_date	Date	Час створення даних ҮҮҮҮ-ММ-	2010-08- 27T12-33-47±00-0
1		(ISO-	DD1hh:mm:ss±hh:mm	$0^{2/112.33.4/\pm00.0}$
1		8601 St		
4	1.0	ring)	<b>TT</b> 1. <sup>1</sup>	2016.00
	modification_date	Date	Час останньої модифікації даних	2010-08- 27T12-33-47±00-0
8		(ISO-	YYYY-MM-DDThh:mm:ss±hh:mm	0
1		8601 St		
4	1 1.	ring)		2016.00
	release_date	Date	Час опуолікування даних ҮҮҮҮ-ММ-	2010-08- 27T12-33-47±00-0
9		(ISO-	DD1hh:mm:ss±hh:mm	$0^{2/112.33.4/\pm00.0}$
1		8601 St		
	• . • . • . •	ring)		, r
$\begin{vmatrix} 2 \\ 0 \end{vmatrix}$	service_title*	Text	Назва ресурсу	Juno Saturn
0		Terrt		httn://
2	access_uri	Text	окь даних (враховуючи регістр)	nup://

1				20160501_120000.j ds
2 2	access_format	Text	Формат файлу	.jds .adr
2 3	access_estsize	Integer	Приблизний обсяг, кілобайт	2 048 000
2 4	data_access_url	Text	Якщо дані розташовані окремо	http:// 20160501_120000.j ds
2 5	access_md5	Text	MD5 контрольна сума	
2 6	thumbnail_url	Text	URL іконки (не більше, як 256х256 пікселів, .png)	http:// 20160501_120000. png
2 7	file_name	Text	Назва файлу	
2 8	target_region	Text	Тип регіону, що цікавить	Atmosphere Magnetosphere etc.
2 9	feature_name	Text	Вторинна назва	IoA_DAM
3 0	bib_reference	Text	Bibcode, doi, URL	D0I
3 1	ra	double	Right Ascension h.h чи h:m:s	10.45632
3 2	dec	double	Declination, deg	15.34746
3 3	publisher	Text	Правовласник	IRA_NASU

Ця таблиця (один рядок для кожного файлу) розміщується на сервері та слугує для вибору та швидкого аналізу/перегляду даних. Таким чином можна підібрати одночасно записані результати спостережень всіма можливими приладами моментів максимального зближення КА Джуно з Юпітером, чи визначити та отримати файли даних з іншими відрізками часу, що досліджується.

На рис.1.2 показано інтерфейс роботи сервісу VESPA. Обирається об'єкт спостережень (планета, оболонка планети, супутник, тощо) тип спостережень (динамічні спектри, картинки, набори оптичних спектральних карт і т.п.). Вводиться початок и кінець інтервалу спостережень і, якщо потрібно, інформація про ідентифікаційні параметри файлів даних (якщо вони відомі). Після цього надсилається запит і система виводить перелік всіх систем спостережень (радіотелескопів, спеціальних приладів на космічних апаратах, служб, довідкових параметрів), які є в базі даних.

На рис.1.3. показані вікна, які послідовно відкриваються і дають змогу вибору інструмента спостережень або служби та файлу даних з панеллю попереднього перегляду.

На рис.1.4. наведено вигляд сторінки служби APIS (Auroral Planetary Imaging and Spectroscopy).

VESPA Virtual European Solar and Planetary A All VO Custom resource Direct Query Advanced Query	ccess	2 O Help
Submit Reset		Plotting tools
Main Parameters		La TOPCAT
Target Name	Target Class	Aladin
Jupiter	Exoplanet Interplanetary Medium	👫 SPLAT
Granule UID	Planet Ring	CASSIS
	Dataproduct Type	
Granule GID	Image	er 3DView
	Profile -	Example queries
Obs ID	Measurement Type	Saturn in March 2012
Time selection		
Data range is included in	The range between	
Time Min	Time Max	
2012-11-29T00:00:00.000	2016-01-09T00:00:00.000	

Рис.1.2. Інтерфейс вибору даних сервісу VESPA.

		EPN Resources							
		litate - litate HF dat	<b>ta</b> 1074 results				۲	٩	Q
Target Class		RadioJOVE - Radio	oJOVE Data Archive	4 results			۲	۲	۹
Ring Sample Satellite Sky Dataproduct Ty Catalog Cube	pe	RoutineJupiter - Ju Dynamic Spectra of the R series of dynamic spectra sampling from 10 MHz to observation frequencies i Credits: <u>Credits:</u> Contributors: Andrée Cocco	upiter Routine Observation of Jupi a recorded on each of the l 40 MHz with 75 kHz steps of is provided. ni fre, Emmanuel Thétas, PA	rvations 176 ter with the Nanc Vançay decamet on the spectral a	results :ay Decameter Array. This dataset contains two ler sub-arrays (i.e. on Left Hand and Right Hand Po xis. It records one spectrum every second on each	I arizatio polariza	● n). Th tion. T	⊕ e rece 'he list	Q iver is of
Dynamic Spec	trum 🔫	Publisher: Station de Rac	iloastronomie de Nançay (	SRN)					
					Plotting tools				
					👼 ТОРСАТ				
					🕖 Aladin				
	time_max (d)	ţ,	access_url	1	or Splat				
	2013-01-06T01:10:59.609		J130105.xml		CASSIS				
	2013-01-05T01:14:59.620		J130104.xml		and a DView				
	2013-01-04T01:18:59.619		J130103.xml		C ODVICA				
	2013-01-03T01:23:59.620		J130102.xml						
	2013-01-02T01:27:59.619		J130101.xml						
	2013-01-01T01:31:59.610		J121231.xml		J121228				
	2012-12-31T01:36:59.610		J121230.xml						

Рис.1.3. Вікна вибору інструмента спостережень або служби та вікно вибору файлу даних з панеллю попереднього перегляду.

	VIESPA Virtual Europ	Dean Solar and Plan source Direct Query Ad	netary Access		2 Co	
esults in service API	6					Plotting tool
now 10 • entries						👼 ТОРСАТ
Column visibility Show all Hide	all Reset Selection					🧭 Aladin
granule_uid 🐙	dataproduct_type	target_name 11	time_min (d)	time_max (d)	access_url	or splat
1z12mqq_proc	image	Jupiter	2014-01-16T00:33:25.935	2014-01-16T00:45:42.135	oc1z12mqq_proc.fits	CASSIS
:1z12mqq_pol_s_pdf	image	Jupiter	2014-01-16T00:33:25.935	2014-01-16T00:45:42.135	oc1z12mqq_pol_s.pdf	Anna 3DView
1z12mqq_pol_n_pdf	image	Jupiter	2014-01-16T00:33:25.935	2014-01-16T00:45:42.135	oc1z12mqq_pol_n.pdf	C ODVICI
1z12mqq_pol_n	image	Jupiter	2014-01-16T00:33:25.935	2014-01-16T00:45:42.135	oc1z12mqq_pol_n.fits	
1z12mqq_cyl_pdf	image	Jupiter	2014-01-16T00:33:25.935	2014-01-16T00:45:42.135	oc1z12mqq_cyl.pdf	
1z12mjq_x2d	image	Jupiter	2014-01-16T00:03:33.935	2014-01-16T00:15:14.135	oc1z12mjq_x2d.fits	
:1z12mjq_proc_pdf	image	Jupiter	2014-01-16T00:03:33.935	2014-01-16T00:15:14.135	oc1z12mjq_proc.pdf	(A)
1z12mjq_proc	image	Jupiter	2014-01-16T00:03:33.935	2014-01-16T00:15:14.135	oc1z12mjq_proc.fits	and the first
dad Omia and a said	image	Jupiter	2014-01-16T00:03:33.935	2014-01-16T00:15:14.135	oc1z12mjq_pol_s.pdf	
chanzinjq_poi_s_pat						

Рис.1.4. Приклад вигляду сторінки служби APIS з даними Hubble Space Telescope в ультрафіолетовому діапазоні про вигляд полюсу Юпітера.

Таким чином, система VESPA дозволяє об'єднати дані в усіх доступних діапазонах, дані детекторів частинок та ін. для всебічних досліджень фізичних процесів і явищ на планетах Сонячної системи та за ії межами.

1.2. Одночасні спостереження антенами метрового та декаметрового діапазону радіовипромінювання Юпітера.

Наземна підтримка місії Джуно забезпечується наступними радіотелескопами.

### Франція:

Nançay Decameter Array (NDA), France,

LOFAR [1.6] station FR606,

NenuFAR radiotelescope.

### Україна:

УТР-2, ГУРТ (РІ НАНУ), УРАН-2 [1.7] (ПГО ІГФ ІМ.С.І.Субботіна НАНУ), УРАН-3 (ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАНУ).

## США:

LWA1, New Mexico,

Owens valley LWA (OLWA),

### Японія:

Iitate & Zao instruments of Tohoku University, Fukui Institute of Technology, University of Electronics and Communication, Kochi University.

З початку 2016 р. почались одночасні спостереження з метою відпрацювання програм обробки даних спостережень на різних телескопах з урахуванням їх особливостей. На рис. 1.5 представлено спектрограми одночасних вимірювань на радіотелескопах NDA, УТР-2 та УРАН-2. Дані представлені після калібрування кожного інструменті і урахування затримки в часі між радіотелескопами.



Рис. 1.5. Спектрограми вимірювань на радіотелескопах NDA, УТР-2 та УРАН-2 з урахуванням затримок розповсюдження сигналу між радіотелескопами.

Також були проведені сеанси записів з найбільш віддаленим від УТР-2 радіотелескопом LWA1 – американським радіотелескопом з діапазоном частот 10-88 МГц. Відстань по дузі великого кола складає більше 10 тис. км. На рис. 1.6 показано результат

обробки даних одночасних спостережень. Видно, що на спектрограмах присутня одна і таж структура S-шторму.



Рис. 1.6. Одночасні спостереження 16.02.2016 S-шторму в радіовипромінюванні Юпітера.

Всі дані як підготовчих сесій спостережень для наземної підтримки місії Джуно, так і під час максимальних зближень КА з поверхнею Юпітера зберігаються на серверах дослідницьких установ і при завершені тестування програмного забезпечення VESPA будуть проіндексовані на сайті і будуть доступні для обробки всім зацікавленим дослідникам.

### 1.3. Виявлення нових типів випромінювання.

Радіовипромінювання системі Юпітер-Іо (Іо-контрольоване випромінювання) відоме з 1964 року і є результатом взаємодії альвенівських хвиль трубки Іо з магнітним полем Юпітера. Ультрафіолетове випромінювання від "п'ят" трубок Іо, Ганімеда і Європи на Юпітері відомо з 2002 року зі спостережень космічного телескопа ім. Хаббла. У випадку Ганімеда, який має власне магнітне поле, вважається, що взаємодія здійснюється через перез'єднання магнітних полів супутника і Юпітера. Радіовипромінювання від взаємодії Юпітер-Ганімед (Ганімед-контрольоване випромінювання) шукали протягом останніх двох десятиріч з неоднозначними результатами. В роботі [1.8] обробка спостережень бази даних радіотелескопу NDA дозволило забезпечити чітке виявлення і визначення характеристик цього випромінювання. Крім того, в роботі [1.9] було вказано, що деякі типи випромінювання, що спостерігається, ще недостатньо вивчені, і механізми їх утворення незрозумілі. В даному проекті були проведені спостереження, і отримані результати, які додатково розширюють спектр явищ, які потребують суттєвої модернізації моделей випромінювання системи Юпітера з супутниками.

По перше, в рамках роботи на попередніх етапах були виділені таки типи випромінювань, які в значній мірі співпадають з відомими типами в сонячному радіовипромінюванні. Це так звані «сплески поглинання» та «зебра-структури». В роботі [1.10] наведені феноменологічні співпадаючі ознаки цих двох типі випромінювання. Доповнюючи вищесказане, в спостереженнях цього року виявлено «сплески поглинання» зі змішаними характеристиками, наведеними в перерахованих статтях. Так, якщо для відомих S-сплесків швидкість частотного дрейфу (рис.1.7) знаходиться в інтервалі 12-25 МГц ([1.9], рис.4, білі і чорні кола), то «slow LS-bursts» (S-сплески з компонентою L-емісії) займають інтервал 4-6 МГц/с.



Рис. 1.7. Частотний дрейф різноманітних сплесків ([1.9], рис.4). Штрихова і точкові лінії – теоретичні криві для згустків електронів зі швидкостями 0.14 ± 0.03*c* і екваторіальними пітч-кутами 2.8°.

Наші нові спостереження (рис.1.8, нижня ліва панель) показують наявність сплесків поглинання з частотним дрейфом 4-6 МГц/с. Тобто, характеристики сплесків поглинання можуть мати не тільки частотні характеристики S-, але і LS-сплесків.



### Litvinenko et al., 2016, Icarus

Рис.1.8. Різноманітні сплески, які потребують вивчення і модифікації моделі випромінювання системи Юпітера і його супутників. Зліва зверху: LS-сплески (синій відрізок): частотний дрейф в 3-4 рази менший за такий у S-сплесків (жовтий відрізок) [1.9]. Справа вверху: сплеск поглинання с частотним дрейфом характерним для S-сплесків (найбільша інтенсивність передує поглинанню) [1.10]. Зліва внизу: сплеск поглинання с частотним дрейфом характерним для C-сплесків (максимум інтенсивності спостерігається після сплеску поглинання – даний звіт). Справа внизу: «зебра-структура» в радіовипромінюванні Юпітера [1.10].

Завдяки регулярним багатоантенним спостереженням з високою роздільною здатністю вдалось виявити набагато більше типів випромінювання. Оскільки різноманіття і повторюваність деяких елементів в спектрограмах очевидна, і тепер наявність Ганімедконтрольованої емісії є беззаперечною, то теоретична модель повинна розвиватись в напрямку пошуку «базових» елементів.

На рис.1.9 показано приклад ще більшого «перетину» властивостей сплесків. На верхній панелі сплеск поглинання маскує зебра-структуру. І цей сплеск, і сплески в діапазоні 23-24 МГц (LS-сплески) мають частотний дрейф 4-5 МГц/с. На нижній панелі показано ще одну варіацію поведінки зебра-структури: зміна модуляції з горизонтальної на вертикальную.



Рис. 1.9. Спостереження Юпітера 17 вересня 2016 р. На верхній панелі сплеск поглинання маскує зебра-структуру. На спектрограмі присутні і LS-сплески (в діапазоні 23-24 МГц), які мають частотний дрейф 4-5 МГц/с. На нижній панелі зміну напрямку модуляції зебра-структури з горизонтальної на вертикальну.

Також важливо відмітити, що багатоантенні спостереження дозволяють надійно розрізняти перешкоди і радіовипромінювання космічних джерел. Навіть при досить незвичному вигляді спектрограм останнього. На рис.1.10 показані дані спостережень Юпітера на УТР-2 (верхня панель) і УРАН-2 (нижня панель) 27 серпня 2016 р. Іо-контрольовані шторми були за добу і через добу після означеного часу. Тому короткі інтенсивні сплески не можуть належати класу відомих S-сплесків.

21



Рис. 1.10. Спостереження Юпітера на УТР-2 (верхня панель) і УРАН-2 (нижня панель). Одночасність появлення і вид спектру однозначно вказують на походження сигналу (1) від космічного джерела. Локальні радіозавади (2) помітно відрізняються на різних радіотелескопах. Поляризаційні дані радіотелескопу УРАН-2 (нижня частина нижньої панелі) вказує на високий ступінь правої кругової поляризації (синій колір) у коротких інтенсивних сплесків. Подібна риса властива відомим S-сплескам.

Але наявність сплесків в записах обох телескопів і поляризаційна однорідність (високий ступінь правої кругової поляризації всіх сплесків) дозволяє впевнено говорити про ще один тип випромінювання, характеристики якого вивчені недостатньо.

Крім великого обсягу отриманих і проаналізованих даних спостережень були отримані теоретичні результати щодо:

- можливості вимірювань найкоротших сплесків від планет Сонячної системи (проведена оцінка міри розсіювання в міжпланетному середовищі)
- використання інтерферометричного режиму між радіотелескопами УТР-2 і ГУРТ для вимірювань поляризаційних характеристик випромінювання Юпітера і калібрування секцій телескопа ГУРТ.

Це дасть набагато ширші можливості для вимірювання поляризації кількома радіотелескопами (УТР-2+ГУРТ, УРАН-2, УРАН-3) і дозволить надійніше розрізняти завади і космічні сигнали.

#### 1.4. Верхня оцінка міри розсіювання в міжпланетному середовищі.

За більш ніж 40-річний період спостережень різних астрономічних об'єктів (активних ядер галактик, радіогалактик, квазарів, пульсарів, атомарних хмар, областей іонізованого водню, залишків наднових, спалахують зірок, блискавок на Сатурні, S і L штормів Юпітера, сонячних спалахів) на радіотелескопі УТР-2 накопичений великий матеріал спостережень про параметри радіовипромінювання досліджуваних об'єктів в декаметровому діапазоні. Ряд цих параметрів можна використовувати для дослідження середовища поширення (міжзоряної плазми, областей іонізації, верхньої магнітосфери пульсарів, пульсарного вітру, міжпланетної плазми, сонячної корони, іоносфери Землі і т.п.). Дослідження параметрів середовища поширення радіовипромінювання залишається актуальним завданням для радіоастрономії. Для цього використовуються різні методи, наприклад, досліджуються характеристики флуктуаційних спектрів мерехтінь точкових і протяжних об'єктів, визначаються сталі часу розсіювання для імпульсних компонент раліовипромінювання пульсарів, визначаються такі інтегральні характеристики середовища поширення, як міра емісіі, міра дисперсії, міра обертання, міра розсіювання та ін. Вельми доцільно провести комплексний аналіз всіх параметрів радіовипромінювання різних об'єктів, які можна використовувати для дослідження міжпланетної плазми. Метою такого аналізу може бути отримання верхньої оцінки міри розсіювання в міжпланетній плазмі для великих кутів елонгації.

У даному підрозділі роботі проводиться аналіз параметрів радіовипромінювання різних астрономічних об'єктів. Цей аналіз проводиться з метою визначення верхньої оцінки міри розсіювання в міжпланетній плазмі для великих кутів елонгації. Діапазон кутів елонгації від ± 120° до ± 180° відповідає умовам проведення нічних спостережень, які оптимальні для декаметрового діапазону. Ми обрали досить широкий спектр досліджуваних об'єктів: позагалактичних, галактичних, планетарних для того, щоб використовувати різні параметри їх радіовипромінювання (кути розсіювання, сталі часу розсіювання, смуги декорреляции, час дисперсійного запізнювання на різних частотах, індекси мерехтінь і т.п.) для виділення в інтегральних характеристиках електрон-іонної плазми, розташованої на промені зору, вкладу міжпланетної і іоносферної плазми. В якості основної досліджуваної характеристики ми обрали міру розсіювання, тому що саме цей параметр середовища поширення дає інтегральну характеристику турбулентності в розподілі електронів на промені зору.

Наявність неоднорідностей в розподілі електронів на промені зору викликає розсіювання. Явище розсіювання призводить до трьох спостережуваних ефектів: збільшення кутових розмірів джерел випромінювання, часового розширення імпульсних компонент радіосигналів і до мерехтінь. Ці ефекти, в свою чергу, характеризуються кутом розсіювання, сталою часу розсіювання, індексом мерехтінь і смугою декореляції.

Аналізувати кут розсіювання не представляється доцільним через те, що в межах Сонячної системи немає джерел випромінювання, для яких цей параметр можна зареєструвати. Такі джерела є на характерних галактичних (кілопарсекових) відстанях або за межами Галактики. Найбільш короткі імпульсні компоненти, які вдається спостерігати в декаметровому діапазоні – це тонка структура радіовипромінювання пульсарів [1.11] і тонка структура блискавок на Сатурні [1.12, 1.13], крім цього спостерігаються короткі імпульсні сплески при розвитку S штормів на Юпітері. Хорошим індикатором розсіювання є смуга декореляції мерехтінь точкових радіоджерел на неоднорідностях електронної концентрації міжпланетної плазми. Знаючи цю смугу можна оцінити множник, що характеризує інтенсивність турбулентності. Після цього можна оцінити саму міру розсіювання.

Такі оцінки є важливими оскільки міра розсіювання, аналогічно тому, як і міра дисперсії, міра емісії, міра обертання – є інтегральними характеристиками середовища поширення. Розбиваючи середу поширення на умовні шари, наприклад: міжгалактична плазма, міжзоряне плазма, міжпланетна плазма, плазмові шари в іоносфері Землі, можна намагатись виділити внесок кожного шару в загальному інтегралі. Це дасть більш точне уявлення про вплив на які поширюються хвилі окремих шарів плазми, розташованих на промені зору.

Метод оцінки міри розсіювання в міжпланетній плазмі і іоносфері Землі.

Нижче наведемо кілька рівнянь, які характеризують інтегральні параметри середовища поширення радіовипромінювання. Ці рівняння також показують взаємозв'язок між різними фізичними параметрами, які в них входять.

Розглянемо просторовий спектр турбулентності електронної концентрації, який має колмогоровський або нормальний розподіл по просторовим масштабами неоднорідностей електронної концентрації:

$$P_{\delta n_{\theta}}(q) = C_{n}^{2} \cdot q^{-\beta}; \ 2\pi/L_{H} \le q \le 2\pi/L_{L}; \ \delta n_{\theta} \sim n_{\theta}, (1.1)$$

де  $q = 2 \pi / L$  – хвильове число або просторова гармоніка,

*L* – просторовий масштаб турбулентності (неоднорідності електронної концентрації),

 $L_{H}$  – зовнішній масштаб турбулентності,

*L*<sub>*L*</sub> – внутрішній масштаб турбулентності,

 $P_{\delta n_e}(q)$  – спектральна щільність потужності просторових флуктуацій електронної концентрації плазми на промені зору,

 $C_n^2$  – коефіцієнт, що характеризує інтенсивність турбулентності, тобто ступінь просторової неоднорідності електронної концентрації в плазмі  $\delta n_e / \langle n_e \rangle$  (тут  $\langle n_e \rangle$  – средня концентрація електронів,  $\delta n_e - \phi$ луктуації електронної концентрації),

 $\beta = 11/3$  – спектральний індекс для колмогоровской просторового спектра турбулентності і

β = 4 – аналогичнчй індекс для нормального просторового спектра турбулентності.

3 рівняння (1.1) можна отримати оцінку флуктуацій електронної концентрації ( $\delta n_s^2$ ):

$$\langle \delta n_{g}^{2} \rangle = \int_{q_{L}}^{q_{H}} P_{\delta n_{g}}(q) dq; q_{L} = 2\pi/L_{H}; q_{H} = 2\pi/L_{L}(1.2).$$

Згідно даним наведеним в [1.14] (C<sub>n</sub><sup>2</sup>) можна представити, як:

$$\langle C_n^2(f_c,\Delta f) \rangle = 2 \cdot 10^{-3} \cdot f^{\mu} \cdot D^{-\mu/2} \cdot \Delta f^{-(\mu-2)/2}, (1.3)$$

де f – частота в ГГц, **D** - відстань між джерелом та спостерігачем в кпс,  $\Delta f$  – смуга декореляції в МГц, тоді  $\langle C_n^2 \rangle$  – середнє значення інтенсивності турбулентності на проміні

зору (вимірюється в м<sup>-20/3</sup>), s – поточна координата на проміні зору,  $\mu = 2\beta/(\beta - 2)$  - спектральный індекс в області частотного спектра турбулентності.

Враховуючи, що  $\Delta f = 1.16/(2\pi\tau_{sc}(f_c))$  з рівняння (1.3) отримаємо:

$$\langle C_n^2(f_c, \tau_{sc}) \rangle = 2 \cdot 10^{-3} \cdot f_c^{\mu} \cdot D^{-\mu/2} \cdot (2\pi\tau_{sc}(f_c)/1.16)^{(\mu-2)/2},$$
(1.4)  
 
$$\langle C_n^2(f_c, \tau_{sc}) \rangle = 2 \cdot 10^{-3} \cdot f_c^{\mu} \cdot D^{-\mu/2} \cdot (\Delta f)^{-(\mu-2)/2}$$
(1.5).

Запишем рівняння (1.4, 1.5) в явному вигляді для нормального і колмогоровського розподілу просторових масштабів турбулентності:

$$\left\langle C_{n_N}^2(f_c, \tau_{sc}) \right\rangle = 2 \cdot 10^{-3} \cdot f_c^4 \cdot D^{-2} \cdot 2\pi \cdot \tau_{sc} (f_c) / 1.16 = 2 \cdot 10^{-3} \cdot f_c^4 \cdot D^{-2} / \Delta f, (1.6) \\ \left\langle C_{n_K}^2(f_c, \tau_{sc}) \right\rangle = 2 \cdot 10^{-3} \cdot f_c^{4.4} \cdot D^{-2.2} \cdot (2\pi \cdot \tau_{sc} (f_c) / 1.16)^{1.2} = 2 \cdot 10^{-3} \cdot f_c^{4.4} \cdot D^{-2.2} \cdot (\Delta f)^{-1.2} , (1.7)$$

тут індекси N і K – відповідають нормальному і колмогоровському законам розподілу просторових масштабів турбулентності відповідно.

Аналогічно тому, як це зроблено в роботах [1.15], визначимо для середовища поширення його інтегральну характеристику, яку прийнято називати мірою розсіювання (*SM*):

$$SM = \int_{0}^{D} C_{n}^{2}(s) ds, (1.8)$$

де *ds* – диференціал довжини на промені зору.

Оскільки міра розсіювання (МР) є інтегральною характеристикою, то її можна представити сумою аналогічних характеристик, які формуються в кожному шарі середовища поширення. Для галактичного джерела радіовипромінювання, наприклад для пульсара, можна проіндексувати шари від джерела випромінювання до спостерігача індексами: НРМ, РW, ISM, IPM, EI, які відповідно позначають верхню магнітосферу пульсара, пульсарний вітер, міжзоряне середовище, міжпланетну середу і іоносферу Землі. Звідси отримаємо:

$$SM = \int_{0}^{D_{HPM}} C_{n_{HPM}}^2 \, ds \, + \int_{D_{HPM}}^{D_{PW}} C_{n_{PW}}^2 \, ds \, + \int_{D_{PW}}^{D_{ISM}} C_{n_{ISM}}^2 \, ds \, + \int_{D_{ISM}}^{D_{IPM}} C_{n_{IPM}}^2 \, ds \, + \int_{D_{IPM}}^{D} C_{n_{EI}}^2 \, ds,$$
(1.9)

де *D<sub>HPM</sub>*; *D<sub>PW</sub>*; *D<sub>ISM</sub>*; *D<sub>IPM</sub>*; *D<sub>EI</sub>* - відстані від джерела випромінювання до верхньої (дальньої) межи відповідного шару в середовищі поширення.

#### Очевидно, що:

$$\int_{D_{PW}}^{D_{ISM}} C_{n_{ISM}}^2 ds \gg \int_0^{D_{HPM}} C_{n_{HPM}}^2 ds + \int_{D_{HPM}}^{D_{PW}} C_{n_{PW}}^2 ds + \int_{D_{ISM}}^{D_{IPM}} C_{n_{IPM}}^2 ds + \int_{D_{IPM}}^{D} C_{n_{EI}}^2 ds, (1.10)$$

Звідси і з рівнянь (1.6) і (1.7) випливає, що основний внесок в сталу часу розсіювання забезпечується міжзоряним середовищем, а не всіма іншими шарами на шляху поширення випромінювання. Саме тому оцінити міру розсіювання в міжпланетній плазмі і іоносфері Землі  $SM_{IPM}$  доволі важко. Однак можливо дати верхню оцінку її значення використовуючи праві частини рівнянь (1.6, 1.7, 1.8) і вимірювання смуги декорреляції  $\Delta f_{IPM}$ . Зі спостережень в декаметровому [1.16] и метровому діапазонах відомо, що смуга кореляції в цих діапазонах порядку центральної частоти спостережень  $\Delta f_{IPM} \sim f_c$  і складає десятки МГц. Прийнявши для радіотелескопу ГУРТ наступну оцінку  $\Delta f_{IPM} \approx 40$ МГц, з рівнянь (1.6) і (1.7) отримаємо для нормального і колмогоровського законів розподілів просторових неоднорідностей електронної концентрації:  $SM_{IPM_N} \leq 0.003086$  кпс·м<sup>-20/3</sup>,  $SM_{IPM_K} \leq 0.0255$  кпс·м<sup>-20/3</sup> або  $lg(SM_{IPM_N}) \leq -2.5106$  і  $lg(SM_{IPM_K}) = -1.5934$  (ми прийняли середню відстань до Сатурна  $D_s = D_{IPM} - D_{ISM} = 4.1482 \cdot 10^{-8}$  кпс).

Аналогічні оцінки можна отримати, якщо в якості сталої часу розсіювання на частоті 25 МГц прийняти часовий інтервал рівний 0.01 мкс. Цей часовий інтервал в сто разів менше, ніж мінімальний час когерентності, яка спостерігається для блискавок на Сатурні. У цьому випадку ми отримаємо такі оцінки тих же величин:  $SM_{IPM_N} \leq 0.007755$ кпс·м<sup>-20/3</sup>,  $SM_{IPM_K} \leq 0.03685$  кпс·м<sup>-20/3</sup> або  $lg(SM_{IPM_N}) \leq -2.1104$  і  $lg(SM_{IPM_K}) = -1.4335$ .

Отримані оцінки виявилися одного порядку. Вони виявилися досить грубими, оскільки їх верхня межа виявилася того ж порядку, що і міра розсіювання в міжзоряному середовищі. З наведених оцінок можна зробити два висновки:

1. Слід розвивати альтернативні методи оцінки міри розсіювання в міжпланетної плазмі.

2. Характерні сталі часу розсіювання джерел радіовипромінювання, які перебувають на Сатурні (блискавки) і на Юпітері (S і L шторми) будуть менше 0.01 мкс в декаметровому діапазоні.

1.5. Використання інтерферометра з короткою базою при реєстрації радіовипромінювання Юпітера

На перший погляд використання інтерферометра з короткою базою (або в більш загальному випадку з короткими базами) при дослідженні радіовипромінювання Юпітера видається нераціональним. Прості оцінки показують, що отримати просторову роздільну здатність трубки Іо або трубки Ганімеда за допомогою такого інтерферометра неможливо. Однак є ще дві опції, які досягаються за допомогою інтерферометра з короткою базою. Перша з них це усунення в вихідних даних некорельованого в просторі радіовипромінювання фону Галактики. Друга це збільшення ефективної площі синтезованого радіотелескопу (РТ) в порівнянні з ефективною площею малої антени, яка входить до його складу, якщо разом з нею використовується велика антена. Відомо, що ефективна площа пари антен, які використовуються в кореляційному режимі, визначається як середнє геометричне від ефективних площ цих антен:

$$S_{CCF}(f_1, l_1, m_1) = \sqrt{S_1(f_1, l_1, m_1) \cdot S_2(f_2, l_2, m_2)}, \qquad (1.11)$$

де  $S_{cCF}(f_1, l_1, m_1)$  - ефективна площа радіотелескопа в кореляційному режимі на частоті  $f_1$ ,  $l_1$ ,  $m_1$  - направляючі косинуси між напрямком на джерело випромінювання та напрямками на Південь, Захід та в зеніт із загального фазового центра (ФЦ) інтерферометра (де загальний ФЦ співпадає з ФЦ 1-го радіотелескопа),  $l_2$ ,  $m_2$  направляючі косинуси в напрямку на джерело випромінювання з ФЦ другого радіотелескопа, який входить до складу інтерферометра,  $S_1(f_1, l_1, m_1)$ ;  $S_2(f_2, l_2, m_2)$ аналогічні ефективні площі, антен, які входять до складу інтерферометра,  $\Delta f = f_2 - f_1$  частота інтерференції (в загальному випадку ця частота залежить від часу  $\Delta f(t)$ ).

Нижче інтерферометра зазначимо, ЩО 3 короткою базою для  $f = f_1$ ;  $l_1 = l_2 = l$ ;  $m_1 = m_2 = m$ . Тепер, коли в якості 1-ї антени з рівняння (1.11) розглядати весь радіотелескоп УТР-2, а в якості другої антени розглядати секцію радіотелескопу ГУРТ, то синтезований з них інтерферометр набуває дві важливі якості. По-перше, його відгук буде містити інформацію про дві поляризації, т.ч. секція радіотелескопу ГУРТ складається з 25 пар ортогонально схрещених диполів. Головні осі диполів радіотелескопу ГУРТ спрямовані з південного заходу на північний схід (позначимо цю поляризацію індексом А) і з південного сходу на північний захід (позначимо цю поляризацію індексом В). По-друге, з огляду на те, що диполі УТР-2 спрямовані зі сходу на захід, радіосигнали які буде реєструвати УТР-2 завжди матимуть відповідні проекційні складові і на поляризацію А і на поляризацію В в радіотелескопі

ГУРТ. Діапазон частот, які перекриваються у двох радіотелескопів, - 8-33 МГц. Він відповідає робочому діапазону радіотелескопа УТР-2.

Тепер рівняння (1.11) для кожної з поляризацій інтерферометра, який складається з радіотелескопів УТР-2 і ГУРТ можна записати в наступний спосіб:

$$S_{CCF_{A}}(f,l,m) = \sqrt{S_{UTR2_{A}}(f,l,m) \cdot S_{GURT_{A}}(f+\Delta f,l,m)}, \qquad (1.12)$$

$$S_{CCF_B}(f,l,m) = \sqrt{S_{UTR2_B}(f,l,m) \cdot S_{GURT_B}(f + \Delta f,l,m)}.$$
(1.13)

Таким чином за допомогою інтерферометра з короткою базою, що складається з радіотелескопа УТР-2 і всього лише однієї секції радіотелескопу ГУРТ, нам вдасться синтезувати радіотелескоп, який має нову якість в порівнянні з радіотелескопом УТР-2 - дві поляризації і має істотно більшу ефективну площу в порівнянні з радіотелескопом ГУРТ в діапазоні робочих частот УТР-2. Оцінимо, який виграш  $\gamma_{A;B}$  ефективної площі, в порівнянні з ефективною площею РТ ГУРТ отримано для такого інтерферометра. З рівнянь (1.12) і (1.13), а також з того факту, що  $f = f_1 \approx f_2$  випливає, що :

$$\gamma_{A} = \frac{S_{CCF_{A}}(f,l,m)}{S_{GURT_{A}}(f,l,m)} = \sqrt{\frac{S_{UTR2_{A}}(f,l,m)}{S_{GURT_{A}}(f,l,m)}}; \\ \gamma_{B} = \frac{S_{CCF_{B}}(f,l,m)}{S_{GURT_{B}}(f,l,m)} = \sqrt{\frac{S_{UTR2_{B}}(f,l,m)}{S_{GURT_{B}}(f,l,m)}}.$$
(1.14)

Найлегше оцінку отриманого виграшу зробити для зенітного напрямку. Приймемо, площа  $S_{UTR2_A}(f,0,0) = S_{UTR2_B}(f,0,0) =$ ефективна ΜГц частоті 18 шо на  $= S_{UTR2}(f,0,0)/2 = 70000 \text{ м}^2$ , й що  $S_{GURT_A}(f,0,0) = S_{GURT_B}(f,0,0) = 350 \text{ м}^2$ . Тоді з рівняння (1.14) отримаємо оцінку виграшу площі для інтерферометра УТР-2 - ГУРТ  $\gamma_A = \gamma_B = 14.1421$ . Таким чином це еквівалентно 14-ти когерентно сфазованим секціям радіотелескопу ГУРТ !!! Їхня загальна ефективна площа на цій частоті буде дорівнювати 4949.7 м<sup>2</sup>. При цьому автоматично вирішується питання калібровки радіотелескопу ГУРТ, тому що на РТ УТР-2 це питання вже вирішено. Інше вирішення питання калібрування РТ ГУРТ виглядає складним, т. я. в своїй конструкції цей радіотелескоп використовує активні диполі.

Такий інтерферометр з короткою базою найдоцільніше використовувати для дослідження найбільш потужних поляризованих джерел радіовипромінювання до яких

належать: Юпітер, Сонце, блискавки на Сатурні і досліджень флуктуацій електронної концентрації в областях випромінювання цих об'єктів.

Розглянемо, як сигнали, що зареєстровані обома радіотелескопами, привести до спільного фазового центру, або, простіше кажучи, - як сфазувати обидва радіотелескопа. Приймемо в якості загального ФЦ обох радіотелескопів ФЦ радіотелескопа УТР-2. Нехай загальний ФЦ має в Декартовій системі відліку координати (0,0,0). Тоді, координати ФЦ РТ ГУРТ будуть відповідати послідовності чисел (х, у, z). Визначимо ефективні напруги на виходах РТ УТР-2 і РТ ГУРТ по кожній з поляризацій як:  $\dot{U}_{UTR-2_{A,B}}(f,l,m,\dot{\varepsilon})$  і  $\dot{U}_{GURT_{A,B}}(f_2,l,m,\dot{\varepsilon})$ . Тоді, опустивши індекси, які характеризують поляризації, відгук по потужності ( $\dot{P}_l(f,\Delta f,l,m,\dot{\varepsilon})$ ) інтерферометра з короткою базою можливо визначити як:

$$\dot{P}_{I}\left(f,\Delta f,l,m,\dot{\varepsilon}\right) = \dot{U}_{UTR-2}\left(f,l,m,\dot{\varepsilon}\right) \cdot \dot{U}_{GURT}\left(f_{2},l,m,\dot{\varepsilon}\right) \cdot e^{i\phi\left(f,\Delta f,l,m,\dot{\varepsilon}\right)},\quad(1.15)$$

де  $\varepsilon = r + i\sigma \cdot \lambda$ - комплексна діелектрична проникливість підстильної поверхні (тут *r*реальна частина діелектричної проникливість поверхні, яка є підстилаючою,  $i = \sqrt{-1}$ ,  $\sigma$ провідність цієї ж поверхні,  $\lambda$ - довжина радіохвилі),  $\varphi(f, \Delta f, l, m, \dot{\varepsilon})$  - відносна фаза між сигналами однієї для обох РТ, які входять до складу інтерферометра, гармоніки.

Розглянемо більш докладно, чому дорівнює відносна фаза для обраної бази інтерферометра:

$$\varphi(f,\Delta f, l, m, \dot{\varepsilon}) = k_x \cdot x \cdot l + k_y \cdot y \cdot m + k_z \cdot z \cdot w, \qquad (1.16)$$

де  $k_x \approx k_y \approx k_z = 2\pi / \lambda = 2\pi \cdot (f + \Delta f) \cdot n (f + \Delta f, f_P, f_H) / c$  - відповідні хвильові числа,  $w = \sqrt{1 - l^2 - m^2}$  - направляючий косинус між напрямком на джерело випромінювання і напрямком в зеніт,  $n(f + \Delta f, f_P, f_H) \approx 1$  - коефіцієнт заломлення в слабо анізотропній холодній плазмі,  $f_P$ ;  $f_H$  - плазмова і гіротропна частоти відповідно (нижче, для компактності розгляду, ми опустимо ці аргументи), c — швидкість світла в вакуумі.

У рівнянні (1.16) зручно виділити розрахункову частину взаємної фази і частина, що залежить від частоти інтерференції:

$$\varphi(f,\Delta f,l,m,\dot{\varepsilon}) = \varphi_{PhC}(f,l,m,\dot{\varepsilon}) + \varphi_{I}(\Delta f,l,m,\dot{\varepsilon}), \qquad (1.17)$$

де  $\langle \varphi_{PhC}(f,l,m,\dot{\varepsilon}) \rangle = 2\pi f \cdot \langle n(f + \Delta f) \rangle \cdot (x \cdot l + y \cdot m + z \cdot w) / c$  - частина фазового зсуву, що розрахована. Вона виникає із-за різниці координат ФЦ радіотелескопів інтерферометра,  $\langle \varphi_l (\Delta f, l, m, \dot{\varepsilon}) \rangle = 2\pi \cdot \Delta f \cdot \langle n(f + \Delta f) \rangle \cdot (x \cdot l + y \cdot m + z \cdot w) / c$  - аналогічна частина фазового зсуву, яка виникає через інтерференцію. Тут обидві частини розраховані для середнього на промені зору коефіцієнта заломлення  $\langle n(f + \Delta f) \rangle$ . Цей коефіцієнт не залежить від часу.

Далі будемо вважати, що обидві частини фазового зсуву, які розраховані, будуть компенсовані при фазуванні й подальшій обробці. Тому не будемо їх враховувати (у попередніх твердженнях була проігнорована залежність ціх складових фазового зсуву від часу, бо залежності  $l(t),m(t),w(t),\Delta f(t)$  вважаються такими, що відомі). Решта флуктуаційних складових фазових зсувів  $\delta \varphi(f,\Delta f,l,m,\dot{\varepsilon},t)$ ;  $\delta \varphi_{phc}(f,l,m,\dot{\varepsilon},t)$ ;  $\delta \varphi_l(\Delta f,l,m,\dot{\varepsilon},t)$  будуть залежати від часу випадковим чином. Ця залежність буде визначатися наявністю флуктуаційної складової в концентрації електронів на промені зору:

$$\delta\varphi(f,\Delta f,l,m,\dot{\varepsilon},t) = 2\pi \cdot (f + \Delta f(t)) \cdot \delta n (f + \Delta f(t),t) \cdot (x \cdot l(t) + y \cdot m(t) + z \cdot w(t)) / c, (1.18)$$

де  $\delta \varphi_{PhC}(f,l,m,\dot{\varepsilon},t) = 2\pi \cdot f \cdot \delta n (f + \Delta f(t),t) \cdot (x \cdot l(t) + y \cdot m(t) + z \cdot w(t)) / c$  - флуктуації фазового зсуву на основній частоті,  $\delta \varphi_I (\Delta f,l,m,\dot{\varepsilon},t) = 2\pi \cdot \Delta f(t) \cdot \delta n (f + \Delta f(t),t) \cdot (x \cdot l(t) + y \cdot m(t) + z \cdot w(t)) / c$  - флуктуації фазового зсуву на частоті інтерференції,  $\delta n (f + \Delta f(t),t)$  - флуктуації коефіцієнта заломлення на промені зору.

З рівнянь (1.17) і (1.18) можна визначити, якими будуть флуктуації коефіцієнта заломлення на промені зору:

$$\frac{\delta n (f + \Delta f(t), t)}{\langle n (f + \Delta f(t)) \rangle} = \frac{\delta \varphi (f, \Delta f, l, m, \dot{\varepsilon}, t)}{\langle \varphi (f, \Delta f, l, m, \dot{\varepsilon}) \rangle}.$$
(1.19)

Для умов інтерферометра з короткою базою в рівнянні (1.19) можна знехтувати внеском інтерференційної частоти тоді отримаємо спрощений вираз з якого можна визначити відносні флуктуації коефіцієнта заломлення:

$$\frac{\delta n(f,t)}{\langle n(f) \rangle} = \frac{\delta \varphi(f,l,m,\dot{\varepsilon},t)}{\langle \varphi(f,l,m,\dot{\varepsilon}) \rangle}.$$
(1.20)

Очевидно, що основні флуктуації коефіцієнта заломлення в умовах міжпланетної плазми будуть виникати поблизу джерел випромінювання. Для Юпітера це магнітні трубки Іо і Ганімеда. Для Сонця це його корона і для Сатурна це райони генерації блискавок. Знаючи відносні флуктуації коефіцієнта заломлення, можна оцінити флуктуації електронної концентрації поблизу джерел випромінювання, які згадані вище. Фактором, що заважає в цих оцінках будуть флуктуації відносної фази в іоносфері Землі. Це джерело похибки можна значно послабити, якщо додатково до інтерферометра з короткою базою використовувати інтерферометр з довгою базою. Тоді можна буде більш точно оцінити середнє значення  $\langle \varphi(f,l,m,\dot{\varepsilon}) \rangle$ .

#### 1.6. Висновки до розділу

Багатоантенні спостереження радіовипромінювання Юпітера дозволяють виділити більш надійно деталі випромінювання космічного джерела. Це призводить до відкриття нових рис і, навіть, типів випромінювання. Особливу цінність мають спостережні дані, записані синхронно з КА Джуно і багатьма різноманітними телескопами світу. Для обміну даними і ефективного дослідження параметрів сплесків розробка програм формування метаданих (інформації про файли даних) є дуже необхідним етапом обробки і отримання нових наукових результатів.

Багатоантенні вимірювання з прив'язкою до абсолютного часу дозволяють проводити різноманітні типи обробки. Одним з них є використання кількох антен в режимі інтерферометрів з короткими і довгими базами. Для коректного впровадження цих режимів зроблені оцінки міри розсіювання в міжпланетній плазмі. Верхня межа цього параметра в декаметровому діапазоні (0.01 мкс) дозволяють досліджувати найкоротші деталі радіовипромінювання джерел Сонячної системи, наприклад, S-сплесків системи Юпітер – супутники і блискавок в атмосфері Сатурна.

Також розроблено алгоритм оцінки відносних флуктуацій коефіцієнта заломлення поблизу джерел радіовипромінювання Сонячної системи таких, як Юпітер, Сатурн, Сонце. Для виключення спотворень, що вносяться іоносферою Землі, даний алгоритм також передбачає спільне використання інтерферометрів з короткими і довгими базами.

#### Література до розділу

1.1. Брауде С. Я., Мень А. В., Содин Л. Г. Радиотелескоп декаметрового диапазона волн УТР-2 // Антенны – Москва: Связь, 1978. – №26. – С. 3–15.

1.2. Konovalenko A., Sodin L., Zakharenko V. et al. The modern radio astronomy network in Ukraine: UTR-2, URAN and GURT. Experimental Astronomy. 2016, Vol. 42, Is. 1, pp. 11–48.
1.3 Boischot A., Rosolen C., Aubier M.G. et al. A new high-grain, broadband, steerable array to study Jovian decametric emission, Icarus, Volume 43, Issue 3, 1980, Pages 399-407, doi:10.1016/0019-1035(80)90185-2.

1.4 Zarka P., Tagger M., Denis L. et al. NenUFAR: Instrument description and science case //
2015 International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT), Kharkiv, 2015, pp.
1-6. doi: 10.1109/ICATT.2015.7136773

1.5. Taylor G. B., Ellingson S. W., Kassim N. E. et al. First Light for the First Station of the Long Wavelength Array // Journal of Astronomy Instrumentation. – 2012. – Vol. 1. – P. 1–56. DOI: 10.1142/S2251171712500043

1.6. van Haarlem M. P., Wise M. W., Gunst A. W. et al. LOFAR: the low-frequency array // Astronomy and Astrophysics. – 2013. – Vol. 650. – P. 1–56. DOI:10.1051/0004-6361/201220873

 Мень А. В., Брауде С. Я., Рашковский С. Л.и др. Система декаметровых радиоинтерферометров УРАН (ч. 1). Основные принципы. Обзор // Радиофизика и радиоастрономия. – 1997. – Т. 2, № 4. – С. 385–402.

1.8. Zarka P., Soares-Marques M., Louis C. et al. Discovery of the radio emission from the Ganymede-Jupiter interaction // 2016, The "SF2A week" June 14th to 17th, Lyon

1.9. Ryabov, V.B., Zarka, P., Hess, S., et al.: Fast and slow frequency-drifting millisecond bursts in Jovian decameter radio emissions // Astron. Astrophys. 2014. Vol. 568, A53. 11P.

1.10. Litvinenko GV, Shaposhnikov VE, Konovalenko AA, Zakharenko VV, Panchenko M, Dorovsky VV, et al. Quasi-similar decameter emission features appearing in the solar and jovian dynamic spectra, 2016, Icarus, Vol. 272, pp. 80–87.

1.11. Ulyanov O.M. et al. Detection of the fine structure of the pulsar J0953+0755 radio

emission in the decametre wave range // MNRAS. 2016. Vol. 455. P. 150–157.

1.12. Милостная К. Ю. Захаренко В. В., Коноваленко А. А., Фишер Г., Зарка Ф., Сидорчук М. А. Тонкая временная структура молний на Сатурне // Радиофизика и радиоастрономия. – 2014. – Т. 19, № 1. – С. 10-19.

1.13. Konovalenko A. A., Kalinichenko N. N., Rucker H. O., Lecacheux A., Fischer G., Zarka

P., Zakharenko V. V., Mylostna K. Y., Grießmeier J.-M., Abranin E. P., Falkovich I. S.,

Sidorchuk K. M., Kurth W. S., Kaiser M. L., and Gurnett D. A. Earliest recorded ground-based decameter wavelength observations of Saturn's lightning during the giant E-storm detected by Cassini spacecraft in early 2006 // Icarus. – 2013. – Vol. 224, No. 1. – P. 14–23.

1.14. Kuzmin A.D., Losovsky B.Y. Measurements of the scattering of pulsars radio emission. Statistical uniformity of large-scale plasma turbulence in the near Galaxy // Astronomical and Astrophysical Transactions. 2007. Vol. 26. P. 597–604.

1.15. Cordes J.M., Lazio T.J.W. NE2001.I. A New Model for the Galactic Distribution of Free Electrons and its Fluctuations // ArXiv Astrophysics e-prints. 2002.

1.16. Kalinichenko N.N. A search for compact decametric radio sources in supernova remnants using the interplanetary scintillation technique // Ap&SS. 2009. Vol. 319. P. 131–138.

#### РОЗДІЛ 2. ГЕЛІОГРАФІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СТАЦІОНАРНИХ СПЛЕСКІВ IV ТИПУ.

Сонце – найближча до нас зірка, спалахова активність якої безпосередньо впливає (завдяки різноманітним процесам) на земні явища, на міжпланетне, а також навколоземне середовище. Термін «сонячна активність» охоплює широке коло астрофізичних ефектів з різноманітними просторовими, часовими і енергетичними масштабами. Сонячні сплески один із проявів цих процесів. Вони представлені у всьому спектрі електромагнітного радіовипромінювання, від гамма випромінювання до радіохвиль. Глибокий аналіз характерних параметрів сонячних сплесків дозволяє встановити фізичні причини і механізми, що приводять до виникнення одного або кількох сплесків. Саме це забезпечує віддалену діагностику еволюції сонячної плазми в короні. Існує загальноприйнята класифікація сонячних сплесків відповідно до їх частотно-часових властивостей [2.1]. В даному розділі ми приділимо особливу увагу сплескам IV типу, які часто пов'язані з дуже потужними і великомасштабними подіями, такими як сонячні спалахи і викиди корональної маси (КВМ).

Сплески IV типу являють собою широкосмугове континуальне випромінювання зі змінною за часом структурою [2.2], що виявляється в різних формах: файбер-сплески [2.3], коливання радіовипромінювання за інтенсивністю [2.4], або хвилястий вузькосмугові візерунки звані зебра структурами [2.5]. Це випромінювання вперше було відзначено Boischot [2.6] на метрових довжинах хвиль і названо сплесками IV типу. Пізніше Weiss [2.7] запропонував розрізняти сплески IV типу по висоті і по руху джерел сплесків. Згодом, у зв'язку з тим, що це радіовипромінювання часто відносять до континууму на дециметрових і сантиметрових хвиль з диференціацією різних фаз в кожному конкретному випадку, це призвело до надлишку різних категорій і підкатегорій сплесків IV типу. Тому Robinson [2.8] зробив спробу провести впорядкування зазначеної різноманіття. В результаті континуальне радіовипромінювання було розділено на чотири підкатегорії: два типу спалахів континууму, спалахів, що повільно дрейфують, і рухомі сплески IV типу. Радіовипромінювання останньої підкатегорії пов'язано з рухом випромінювачів через КВМ. У цьому контексті слід зазначити, що сплески IV типу можна розділити на два різних класи: рухомі (тип IVm) і стаціонарні (тип IVs) сплески. Зазвичай кожен такий стаціонарний радіосплеск – це широкосмугове континуальне випромінювання, пов'язане зі спалаховою активністю. Воно генерується або під час вибухової фази сонячних спалахів, або з'являється із запізненням після такого спалаху. При цьому положення джерела сплеску буде вищим за положення джерела спалаху,

пов'язаного з цією подією. Передбачається, що це тривалий випромінювання викликається енергетичними електронами, захопленими всередині корональних структур, таких як магнітні арки.

Багато спостережень низькочастотних сплесків IV типу були виконані в 70-80 роки минулого століття. Зокрема за допомогою Clark Lake Radio Telescope (USA) радіовипромінювання IV типу досліджувалося в метровому і декаметровому діапазонах довжин хвиль [2.9]. Потім, використовуючи геліограф Culgoora Radio Heliograph (Австралія) до тих пір, поки він не був виведений з експлуатації, сплески IV типу реєструвалися на частотах 43, 80 і 160 МГц [2.10]. Сонячні спостереження за допомогою індійського геліографа Gauribidanur Radio Heliograph на частоті 80 МГц, доповнені спектральними спостереженнями в смузі частот 35-85 МГц, належать до сучасних досліджень низькочастотного сонячного випромінювання IV типу. Однак ці дослідження брали до уваги тільки рухомі сплески IV типу і пов'язані з ним явища [2.11,2.12].

Сплески IV типу в декаметровому діапазоні – нечасті прояви сонячної активності. Такий тип радіовипромінювання нижче 30 МГц був зареєстрований радіотелескопом УТР-2 [2.13,2.14] тільки кілька разів протягом літніх компаній 2002-2004 років. Проте, це дозволило виконати певний статистичний аналіз таких декаметрових сплесків [2.3,2.15]. Зокрема, ці сплески мали тривалості від одного до декількох годин, а їх потоки досягали величини 103 е.с.п. (1 е.с.п. = 10-22 Вт м<sup>-2</sup> Гц<sup>-1</sup>). Більшість з них були досить тісно пов'язані з відповідними КВМ, але в деяких випадках такі сплески з'явилися без участі КВМ. Нещодавно в роботі [2.4] було проаналізовано докладно один з стаціонарних сплесків IV типу, який спостерігався на частотах 8-32 МНz за допомогою антеною решітки URAN-2. Дана робота була спрямована на пошук зв'язку квазіперіодичних коливань в інтенсивності у випромінювання IV типу з проявами геліосейсмології. Таким чином, наведений вище огляд успіхів у вивченні сплесків IV типу показує, що просторові особливості джерел сплесків IVs типу в декаметровому діапазоні довжин хвиль спостережень ще залишаються недослідженими.

В даний час за рахунок впровадження нових підходів в космічні і наземні спостереження якість аналізу сонячних подій суттєво покращилась. Особливо це стосується успіхів в побудові різноманітних сонячних зображень. Так при отриманні зображення внутрішньої корони широко застосовуються дані кілька космічних місій: Extreme Ultraviolet Imager (EUVI) на борту Solar TErrestrial RElations Observatory [2.16], Atmospheric Imaging Assembly (AIA) Сонячної Динамічної Обсерваторії [2.17], Extreme ultraviolet Imaging Telescope (EIT) Сонячної і Геліосферіческой Обсерваторії [2.18]. Для дослідження зовнішньої корони використовується ряд наземних радіотелескопів,
інтенсивно розвиваються в останні роки. Низькочастотні антенні решітки корисні для проведення спектральних вимірювань і побудови зображень, що власне здійснюється на LOw Frequency ARray [2.19], Murchison Widefield Array [2.20] і на модернізованих індійських інструментах Gauribidanur Radio Observatory [2.21]. Крім того, сонячний радіогеліограф Nançay дає важливі сонячні зображення в метровому і дециметровому діапазоні. Одночасне порівняння спектральних даних і таких зображень призводить до плідної синергії між цими підходами. У зв'язку з цим слід зазначити, що кілька чудових статей частково або повністю представили просторову діагностику сонячних радіовсплесков, а саме: тип II [2.11,2.22-2.28], тип III [2.29], S-сплески [2.30], а також тип IVm [2.11,2.12,2.31]. Безумовно, детальний аналіз спектральних спостережень і побудова зображень дуже необхідні для глибокого розуміння явищ, що спостерігаються. Даний підхід особливо важливий для вивчення сонячних сплесків, що генеруються різними сонячними процесами. У той час як двовимірні радіозображень дозволяють встановити просторову еволюцію джерел сплесків в сонячній короні, вимірювання спектрографа у вигляді динамічних спектрів дають корисну інформацію про конкретні спектральні характеристики сплесків. З 2010 року, використовуючи модернізований радіогеліограф на базі української Т-образної антеною решітки, ми отримали спектральні записи сонячних сплесків разом з їх даними, що дозволяють побудувати зображення їх джерел, в діапазоні частот 8-33 МГц. Це відкриває абсолютно нові можливості в області сонячної астрономії.

У цьому розділі ми розглядаємо подію, що відбулася 6 вересня 2014 року. Вона включає в себе кілька складових: групу сплесків III типу, низькочастотні (НЧ) і високочастотні (ВЧ) сплески II типу, і також НЧ і ВЧ сплески IV типу. Цікаво відзначити, що сплески IV типу однозначно належать класу стаціонарних сплесків IV типу. Зауважимо тут також, що наша увага буде сфокусовано на вимірах НЧ зображень, приділяючи при цьому пильну увагу і іншим "учасникам" цього складного явища.

## 2.1. Інструменти і методологія отримання декаметрових зображень.

Двовимірний (2D) радіогеліограф телескопа УТР-2 – це радіоастрономічний інструмент для регулярних низькочастотних сонячних спостережень на частоті 8-33 МГц. Він був розроблений в рамках дослідницької програми з побудови сонячних зображень. Історія розвитку інструменту детально описана в роботі [2.32]. В даний час цей інструмент є сучасним пристроєм для отримання двовимірних зображень розподілу яскравості радіовипромінювання Сонця. Слід зазначити, що апаратні засоби геліографа вбудовані в антенну систему УТР-2 шляхом підключення додаткових блоків в останню. Найбільш важливй з них відповідає за зміну положення п'яти променів діаграми

спрямованості уздовж годинного кута (або уздовж U координати). Додатковий модуль фазування, вбудований в систему фазування плеча Захід, виконує швидке сканування області неба одночасно п'ятьма олівцевими променями шляхом переміщення діаграми спрямованості антени послідовно по восьми дискретним положенням (див. більш детальну інформацію про технічні особливості цієї системи в роботі [2.33]). Кутовий крок, який здійснює такий додатковий модуль фазування по годинному куту, береться таким же, як і різниця між центрами променів (діаграми-віяла) по схиленню ~ 25' (або по іншому - уздовж координати V). Рис. 2.1 показує повну картину поля зору геліографа в зеніт. Воно утворює прямокутну матрицю в площині UV, що складається з 40 елементів. Поле зору охоплює просторовий сектор ~ 2.1 ° ×3.3 ° на небі. Промені діаграми спрямованості в такій матриці примикають один до одного на частоті 25 МГц, але на більш низьких частотах вони перекриваються. В даному випадку система стеження УТР-2 за спостережуваним об'єктом здійснюється накладенням центру поля зору з центром сонячного диска (див. рис. 1). Слід зазначити, що прямокутний растр зберігає форму тільки для спостережень поблизу меридіана. В інших випадках растрова форма може помітно відрізняється від прямокутної. У режимі двовимірного геліографа траєкторія руху Сонця по небу перетинає поле зору геліографа під якимось фіксованим кутом через добовий рух небесної сфери. Якщо положення поля зору геліографа не змінювати в процесі спостережень, то через якийсь період часу Сонце покине його. Щоб супроводжувати Сонце по небу протягом дня, необхідно періодично вносити зміни в положення поля зору геліографа по годинному куту і схиленню на випередження вперед в напрямку на захід, щоб спостерігати чергове проходження Сонця через поле зору геліографа в черговий раз.

спостереження радіовипромінювання Для сонячного використовується послідовний режим. У цьому випадку потрібно всього лише один двоканальний широкосмуговий цифровий приймач в якості записуючого пристрою, що значно знижує вартість обладнання геліографа. Саме остання конфігурація геліографа була використана під час наших спостережень 6 вересня 2014 року. Використовуючи даний режим, нам необхідно відновити кожен кадр геліографічних спостережень у вигляді двомірного зображення з послідовних їх записів. Зазвичай частота повторення зображення геліографа УТР-2 вибирається з особливостей завдань досліджень. Для спостережень сонячного радіовипромінювання з повільними варіаціями інтенсивності за часом (наприклад, радіовипромінювання спокійного Сонця) швидкість отримання геліограм досить вибрати близькою до 2 хвилин, при цьому швидкість супроводу Сонця (перемикань) радіотелескопу УТР-2 становитиме кількох десятків хвилин. Недавні результати геліографічних спостережень сонячної корони в декаметровому діапазоні довжин хвиль за допомогою УТР-2 під час низької сонячної активності були представлені в роботі [2.34]. Що стосується вимірювань проявів високої сонячної активності, таких як короткоживучі сплески і транзіенти, сплески з тонкою структурою та інше вимагають збільшення швидкості отримання зображень разом зі збільшенням часової роздільної здатності в послідовних записах. Виходячи їх цих зауважень. геліографічні дослідження 6 вересня 2014 року були виконані в режимі запису одного геліографічного кадру за 3 секунди. Це, як нам видається, цілком достатньо для надійного стеження за довгоживучими джерелами сплесків в сонячній короні по їх частотно-часовим геліографічним записам.



Рис. 2.1. Геліографічна карта, що складається з 40 променів, які покривають поле огляду ~ 2.1 ° ×3.3 ° по схиленню і годинному куту, відповідно. Положення олівцевих променів діаграми спрямованості в зеніті на частоті 25 МГц по напівширину показано чорними колами, а пунктирними помаранчевими колами представлені геліоцентричні відстані в 1, 2 і 4 сонячних радіусу. Між променями кутовий поділ в даному випадку дорівнює ~ 25'.

Процедура сонячних геліографічних спостережень на радіообсерваторії УТР-2 виглядає наступним чином. Отримання сонячних зображень здійснюється за допомогою вказаного двовимірного геліографа. Для того, щоб зробити спостереження більш інформативними, вихідні сигнали решіток Північ і/або Південь використовуються також для отримання багаточастотних спектральних даних (динамічних спектрів). Подання

сонячних радіоданних у вигляді динамічних спектрів (на основі швидкого перетворення  $\Phi$ ур'є, що показує еволюцію інтенсивності радіовипромінювання в часі і по частоті) - це традиційний метод для дослідження властивостей сонячних сплесків. Він дозволяє відрізняти сплески один від одного візуально за їх різною частотно-часовою поведінкою, а саме по швидкості дрейфу частоти, тривалості, тонкій структурі і так далі. Крім того, такі дані полегшують розуміння і геліографічних записів в послідовному режимі, щоб в процесі відновлення двомірних зображень джерел сонячних сплесків вони б виходили правильно. В якості приймальної частини, ми використовували цифрові приймачі DSPZ, низькочастотних спеціально розроблені для радіоастрономічних спостережень (докладніше вони описані в роботі [2.35]). Для наших досліджень ми використовували два комплекти DSPZ. Перший з них служив в якості приймача геліографа, а другий записував спектральні дані.

## 2.2 Спостереження і аналіз даних

### Засоби спостережень.

Сонячна подія 6 вересня 2014 року була вивчена за допомогою космічних і наземних інструментів. Вони дозволяють детально спостерігати сонячні явища на різних етапах його розвитку. Спектральні радионаблюдения проводилися наступними радіоастрономічними інструментами (їх спільний динамічний діапазон показаний на рис. 2.2):

- спектрограф ORFEES, який належить радиообсерватории Nançay і проводить спостереження в діапазоні частот 140-1000 МГц;
- спектрограф e-Callisto з трьома Callisto приймачами, сигнал на які подається з біконічної (10-100 МГц) і лог-періодичної антен (100-200 МГц і 200-400 МГц) на Сонячно-земній обсерваторії Rosse (http://www.rosseobservatory.ie);
- декаметрова антенна решітка Nançay [2.36], яка використовується в діапазоні частот 10-70 МГц;
- антенна решітка УТР-2, призначена для спостережень, починаючи з 8 МГц до 33 МГц.

Тут і далі ми будемо розрізняти ВЧ сплески II і IV типів, що знаходяться в діапазоні частот ORFEES / RSTO, і НЧ сплески таких типів, що відносяться до діапазону частот NDA / УТР-2. Радіозображень корони Сонця були отримані за допомогою радіогеліографа Nançay [2.37] на дев'яти окремих частотах в межах діапазону 150-445 МГц, а також геліографом УТР-2 на частотах 16.5-33 МГц з дозволом по частоті 4 кГц. Звернемо увагу на те, що найбільш цікаві результати щодо досліджуваної події були отримані завдяки вимірам радіозображень в низькочастотному діапазоні.

### Початок КВМ.

6 вересня 2014 року початок КВМ було відзначено в 7:45:57 UT за допомогою космічного апарату STEREO Behind EUVI. Спостереження показали, що КВМ почав свою еволюцію як сукупність висхідних петель в активній області (АО). Виверження розвивалося над NOAA AT 12157 (S13 E57), що містить 14 сонячних плям. Група сонячних плям мала складну магнітну структуру (вуб за відповідною класифікацією). Початок вищезгаданого КВМ збігається за часом з ранньої фазою наростання сонячного спалаху класу С8.0 в рентгенівському випромінюванні з цієї АО (див. рис. 2.3). Дуже ймовірно, КВМ і спалах були пов'язані з одним і тим же еруптивним процесом на Сонце. В 10:12:00 UT та 10:54:26 UT це виверження було зареєстровано в спостереженнях коронографа на космічних апаратах SOHO і на обох STEREO. За даними SOHO / LASCO C2, C3 і за вимірюваннями STEREO COR2В в проекції на небесну сферу швидкості виверження були дуже близькі один до одного за величиною: близько 414 км с<sup>-1</sup> і 390 км с<sup>-1</sup>, відповідно. Цей КВМ характеризується кутовою шириною приблизно в 246 кутових градусів при майже постійній лінійній швидкості, а прискорення становило близько +0.5 км с<sup>-2</sup> за спостереженнями SOHO / LASCO C2, C3. Крім того, розвиток виверження супроводжувався формуванням як корональної хвилі (ймовірно, ударної), так і деформацією корональної структури, які будуть розглянуті нижче.

## Сплески II і III типів.

У цей день прояв сонячної активності в радіодіапазоні було відзначено великою кількістю ВЧ сплесків, які спочатку з'явилися з ~ 08: 40 UT і закінчилися в ~ 9: 10 UT. Ці сплески чітко видно на спектрі ORFEES. Було встановлено, що сплески мають риси, характерні для сплесків III типу. Вони показують негативну швидкість частотного дрейфу. Нагадаємо, що сплески III типу виникають через субрелятівістскі електронні пучки, що розповсюджуються вздовж відкритих силових ліній магнітного поля з сонячної корони в міжпланетне середовище. Однак слід згадати, що навіть позитивна швидкість частотного дрейфу сплесків III типу може бути пояснена рухами електронних пучків, спрямованих назовні сонячної корони [2.38].

Радіовипромінювання II типу на динамічному спектрі з'явилося у вигляді двох сплесків після сплесків III типу. Ми розділимо радіосплеск II типу на НЧ і ВЧ частини, де ВЧ показує гармонічну структуру.



Рис. 2.2. Динамічний спектр сплеску IV типу за спостереженнями 6 вересня 2014 року. Спільний спектр отриманий із записів спостережень інструментів ORFEES (450-144 МГц), e-Callisto (144-100 МГц), NDA (80-33 МГц) і УТР-2 (33-17 МГц). Період спостережень за допомогою УТР-2 був коротшим за часом, ніж у інших телескопів. Його сесія спостережень була закінчена о 13:00 UT. На даному малюнку представлені різні компоненти радіосплеску, а також інші зареєстровані радіоподії.

На рисунку 2.2 показаний ВЧ сплеск II типу, а на рисунку 2.3 він же більш докладно. Цей сплеск складається з двох смуг (або лейнів), а також включає в себе випромінювання на основній (F) частоті і гармоніці (H), при цьому відношення між ними становить близько 1.9. Випромінювання F і H почалися в ~ 09: 12 UT на частотах 224 МГц і 425 МГц відповідно. Згідно динамічному спектру на рисунку 2.2 випромінювання на основній частоті різко обмежене по частоті і часу, на 144 МГц і о 09:22 UT, відповідно, в той час як гармонічне випромінювання проіснувало до 10:15 UT і зійшло до нуля на частоті ~ 120 МГц. Швидкість частотного дрейфу ВЧ радіосплесків II типу становила близько 0.122 МГц с<sup>-1</sup>.



Рис. 2.3. Сонячне рентгенівське випромінювання, що вимірювалось космічним апаратом GOES-15 6 вересня 2014 року. На рисунку показані три сонячних спалахи класу С. Час початку КВМ відзначений на кривих випромінювання зеленими хрестиками. Заштрихована область відзначає неробочий час GOES.



Рис. 2.4. Профілі інтенсивності в часі взяті з динамічного спектру УТР-2 і кривої рентгенівського випромінювання GOES. Форма профілю показує наявність двох горбів по інтенсивності. Зелені області вказують тривалість двох сонячних спалахів, а також червоні пунктирні лінії показують пікові моменти спалаху.

На рис. 2.2 представлений динамічний радиоспектр NDA, на якому можна розрізнити H4 сплеск II типу. З цих записів можна зробити висновок, що H4 сплеск II типу почався якраз незадовго до свого B4 компаньйона. Він з'явився о 09:01 UT поблизу 67.2 МГц і тривав до 9:23 UT на ~ 39.4 МГц. Швидкість частотного дрейфу H4 сплеску II типу дорівнювала 0.024 МГц с<sup>-1</sup>, що дуже характерно для сплесків II типу на метрових хвилях.

Прийнято вважати, що джерелами радіовипромінювання сплесків II типу є ударні хвилі. Вони можуть бути викликані КВМ, а електрони, що призводять до цього радіовипромінювання, прискорюються зазвичай на крайній передній кромці (на "носі") або / і на флангах ударних хвиль. Що стосується розглянутих сплесків II типу, в той час не було ніяких інших відповідних джерел (агентів), які могли б викликати ударні хвилі, за винятком хіба що КВМ. Тому цілком ймовірно, що ВЧ і НЧ випромінювання II типу генеруються ударною хвилею, що виникає під час одного єдиного виверження.

## ВЧ і НЧ сплески IVs типу.

Подія 6 вересня 2014 року була цікава не тільки присутністю двох сплесків II типу, а й наявністю континууму випромінювання, що займає значний частотний діапазон, причому континуум був розділений досить помітно на високих і низьких краях частотного діапазону. Кожен з них показує специфічні особливості, характерні для стаціонарного радіовипромінювання IV типу. В даний час вважається, що джерелом, що призводить до стаціонарного тривалого континууму в радіовипромінюванні Сонця, є електрони, що рухаються в сонячних магнітних пастках. Оскільки ВЧ і НЧ сплески IVs типу з'явилися майже з однієї і тієї ж області в сонячній короні (див. подробиці нижче), розумно припустити, що їх джерела були однаковими. В роботі [2.4] було запропоновано, що сонячні структури, такі як високі корональні арки, можуть призводити до низькочастотного радіоконтінууму у зовнішній сонячній короні. Відзначимо також, що ця концепція підтверджується геліографічними вимірами, які будуть представлені нижче.

### НЧ сплеск IVs muny

НЧ стаціонарне випромінювання IV типу описуваної події простягалося від метрового до декаметрового діапазону довжин хвиль. У декаметровому діапазоні цей радіосплеск спостерігався за допомогою двовимірного радіогеліографа УТР-2, а також решітками інших радіотелескопів. Антенні решітки Північ і Південь УТР-2 також були задіяні в спектральних вимірах (для отримання сонячних динамічних спектрів з високою чутливістю) з високою роздільною здатністю за часом і частотою (~ 100 мсек і ~ 4 кГц,

відповідно) в частотному діапазоні 17.0-33.0 МГц. Сама НЧ частина радіоспектра показана на рис. 2.2 і була отримана за вимірюваннями за допомогою решітки Північ. Це декаметрове радіовипромінювання спостерігалося протягом трьох годин, починаючи з 9:55 UT і до кінця цієї спостережної сесії о 13:00 UT. Декаметровий континуум мав стійку нерегулярну за формою картинку (візерунок) на динамічних спектрах. Дрібномасштабний аналіз його тонкої структури виявляє, що це радіовипромінювання складається з окремих фрагментів (клаптиків), подібних файбер-сплескам. Найбільше значення щільності потоку радіовипромінювання в даному сплеску склало ~ 10<sup>2</sup> е.с.п. На жаль, можливості вимірювання поляризації на радіотелескопі УТР-2 обмежені (диполі – одна лінійна поляризація – чутливі лиш до еліптичної поляризації завдяки ефекту Фарадея і не дають змогу відрізнити неполяризоване випромінювання від такого з круговою поляризацією). На більш високих частотах радіовипромінювання було зареєстровано за допомогою NDA. Спектр NDA показує, що на метрових хвилях стаціонарний сплеск IV типу почався о 09:50 UT, і приблизно через 5 хвилин його можна було помітити в декаметровому діапазоні довжин хвиль. До кінця спостережень, згідно спектральним даними УТР-2 6 вересня 2014 року, випромінювання стаціонарного континууму IV типу майже припинилося на низьких частотах, але воно тривало аж до ~ 13: 20 UT на більш високих частотах.



Рис 2.5. Спектр ORFEES (144-450 МГц, від 8:29 UT до 14:01 UT), доповнений температурними профілями яскравості NRH (білі лінії) на частотах 173 МГц, 228 МГц, 270 МГц, 327 МГц і 408 МГц у той же самий час.

Через велику кількість потужних радіоперешкод в спектрах NDA нижче 30 МГц спектральні особливості стаціонарного сплеску IV типу не вдається розпізнати, в той час

як висока чутливість і висока просторова роздільна здатність радіотелескопа УТР-2, дозволяє це зробити і з'ясувати багато цікавих спектральні особливості даної події. Рис. 2.4 показує суперпозицію тимчасових профілів на шести частотах в межах 23-33 МГц, а також профіль рентгенівського радіовипромінювання GOES в межах 0.05-0.4 нм. Використовуючи ці дані, можна виділити два уярчення інтенсивності (горби на радіопрофілях) на тлі декаметрового континууму. Слід зазначити, що поява двох послідовних сонячних спалахів класу С2.5 і С1.7 з NOAA AO 12157 були близькі за часом до цих уярчень. Зелені смуги на рисунку 4 вказують на тривалість спостережуваних спалахів, від їх початку до кінця, а пунктирна червона лінія всередині смуги відзначає момент часу піку спалаху. Існує згода (близькість по появі в часі) між головними вершинами інтенсивності рентгенівського випромінювання і збільшенням інтенсивності декаметрового випромінювання. Ця часова кореляція між проявами в рентгенівському і радіо діапазоні вказує на фізичний взаємозв'язок в їх джерелах випромінювання. Якщо припустити, що джерело декаметрового радіовипромінювання пов'язане корональною петлею з АО, то радіоуярчення можна пояснити інжекцїєй енергійних електронних пучків (індукованих спалахом) в цю петлю.

## ВЧ сплеск IVs типу.

На відміну від стаціонарного НЧ сплеску IV типу аналіз ВЧ радіовипромінювання IV типу вимагає великих зусиль. Справа в тому, що ORFEES інструмент, який використовується в даний час, має порівняно слабку чутливість. Рис. 2.5 показує ВЧ частину (144-450 МГц) динамічного спектру, отриманого за допомогою ORFEES. Дане спектральне представлення було побудовано з множини послідовних 30-хвилинних сканів у вигляді єдиного зображення. Щоб виділити корисні спектральні особливості, з вихідними даними необхідно провести попередню обробку по вирахуванню фону. Після того як фон видаляється з динамічних спектрів, вони стають зручними для дослідження, як це можна судити по рис. 2.5. Звідси очевидно він містить ВЧ сплеск ІІ типу з гармонійною структурою (відзначені пунктирними лініями синього кольору), а також радіоконтінуум, починаючи з ~ 09:50 UT і тривалістю близько 4 годин. Це радіовипромінювання приймає форму візерунків з яскравих волокон, розподілених в широкому діапазоні частот (144-400 МГц). Дані ознаки вказують на наявність широкосмугового континууму випромінювання, а самі волокна є найбільш інтенсивними частинами радіовипромінювання, отриманими спектрографом ORFEES, а не весь ВЧ континуум IV типу в цілому. Через відсутність кращих спектральних даних від інших радіоспектрографов в смугах частот, що перекриваються, важко отримати і більш якісне

уявлення про це радіовипромінюванні. Таким чином, одним з можливих способів підтвердити існування континууму радіовипромінювання з метою з'ясування природи його джерела можуть служити відповідні геліографічні спостереження. У цьому випадку можуть бути корисні NRH карти, які ясно показують наявність постійного радіоджерела в діапазоні частот від 150 МГц до 327 МГц. Слабка присутність даного радіоджерела спостерігається також на частоті 408 МГц. На підставі цих вимірів ми визначили температуру яскравості сплеску на окремих частотах (173 МГц, 228 МГц, 270 МГц, 327 МГц і 408 МГц), доступних в вимірах. Вони були накладені на динамічний спектр ORFFES. В цьому випадку характерні значення яскравісних температур доходили до 10<sup>9</sup> К, що є очевидним проявом джерела радіовипромінювання. Слід зауважити, що спектральні дослідження і побудовані зображення узгоджуються одне з одним. Це не дивно, так як їх дані мають загальну фізичну природу. Беручи до уваги ці результати, реєстроване випромінювання можна віднести до стаціонарних сплесків IV типу.

Цікаво також вивчити питання, чи існують спектральні горби, знайдені на НЧ радіовипромінюванні IVs типу, також в ВЧ радіовипромінюванні. Через низьку чутливість інструменту аналіз радіопрофілей ORFEES не виявляється наявність уярчення інтенсивності. З іншого боку, температурні профілі NRH показують коливання, які занадто сильні, щоб виявити ці уярчення. Іншою можливою причиною відсутності подібних спектральних горбів в ВЧ сплеску IVs типу є те, що два спалахи З класу були занадто слабкі, щоб привести до ефекту, що спостерігається, і який був помічений в НЧ записах УТР-2 завдяки високій чутливості останнього.

## НЧ і ВЧ радіозображення.

Наведений вище аналіз, який був зроблений для НЧ і ВЧ сплесків IVs типу, стосується тільки їх спектральних властивостей. Найважливіший факт, який заслуговує на нашу окрему увагу, є те, що, слідуючи спостереженнями різних інструментів, НЧ і ВЧ сплески IVs типу добре узгоджуються один з одним за часом. Згідно спектральним даними NDA, НЧ сплеск IVs типу почався в ~ 9:50 UT, а трохи пізніше це радіовипромінювання було прийнято радіотелескопом УТР-2. Для того, щоб визначити час початку ВЧ випромінювання IVs типу, давайте звернемося до геліографічна вимірам на увазі не цілком ясних ВЧ спектральних даних.

Джерело ВЧ сплеску IVs типу спостерігався з 9:48 UT на частотах від 327 МГц до 173 МГц, а потім на частоті 150 МГц в записах NRH (див. рис. 2.6). сонячне радіовипромінювання, яке охоплює діапазон часу 09:40-14:00 UT, представлено як дві яскравих області. Це можна пояснити наявністю більш раннього окремого радіоджерела (першого з цих областей) раніше 9:48 UT. Потім інтенсивність цього випромінювання поступово зменшувалася, починаючи з високих частот, і майже відразу ж з'явився інше джерело, що відповідає ВЧ випромінюванню IV типу. У послідовних NRH зображеннях це спостерігається як стрибок у положеннях джерела. Малюнок 6 являє собою нерухомий кадр, отриманий в 11:24:02 UT, і він показує наявність джерела радіовипромінювання, відповідного ВЧ радіовипромінюванню IVs типу. В результаті вперше достовірно було встановлено близькість за часом початку ВЧ сплеску IVs типу (в ~ 9: 48 UT) з появою НЧ сплеску IVs типу (в ~ 9: 50 UT) в спектральних даних. Крім того, за даними NRH після 13:10 UT спостерігається зниження яскравості температури на спостережуваних профілях. NRH карти також показують, що джерело ВЧ сплеску IVs типу повністю припинило випромінювати в ~ 13: 40 UT в смузі частот від 327 до 228 МГц, в той час як на частоті 150 МГц і 173 МГц яскравісна температура зменшилася в три рази в порівнянні з його значення о 13:10 UT. Це вказує на те, що на динамічному діапазоні NDA радіовипромінювання НЧ сплеску IVs типу зникло приблизно о 13:40 UT. Беручи до уваги всі частини вищевказаних доказів, ми можемо припустити, що НЧ і ВЧ сплески IVs типу мали одне і те ж походження.



Рис. 2.6. Положення радіоджерела ВЧ сплеску IVs типу за даними NRH в 11:24:02 UT на шести різних частотах. Білі контури показують 90% і 95% максимальної яскравісної температури. Зірочка вказує приблизне положення NOAA AO 12157 на диску Сонця протягом цього часу.



Рис. 2.7. Тривимірна кутова структура сплеску IV типу в 12:00:24 UT в частотному діапазоні 18.5-31.0 МГц за даними радіогеліографа УТР-2. Білою окружністю показаний сонячний диск. Розмірність кадру з метою згладжування збільшена в десять разів.

Для того, щоб дослідити просторові особливості відповідних радіоджерел, ми розглянемо геліографічні вимірювання, виконані радіогеліографами NRH і УТР-2. Приклад радіогеліограмм УТР-2 показаний на рисунку 7. У цьому випадку дані були зібрані в так званий тривимірний (3D) куб, уздовж двох просторових координат і по частоті. Використовуючи відповідні моделі електронної густини, можна встановити висоту відповідних випромінюючих шарів в сонячній короні. На рисунку 7 такий 3D яскравісний розподіл НЧ сплеску IVs типу в частотному діапазоні 18.5-31.0 МГц в 12:00:24 UT був поділений на 50 частотних каналів. Хоча загальна кількість геліограм УТР-2, отриманих під час спостережень з 9:55 UT до 13:00 UT в діапазоні 16.5-33.0 МГц (4096 спектральних каналів) з формуванням кадру за 3 с, було значно більше (близько ×1.5 10<sup>6</sup>), необхідності враховувати всю цю велику кількість даних немає. Для того, щоб спостерігати зміни положення джерела в сонячній короні, досить взяти п'ятдесят частот в кожному 3-секундному кадрі. Далі ми будемо порівнювати геліограми УТР-2 з відповідними зображеннями NRH. Нагадаємо, що в останньому випадку геліографічні дані представлені на декількох окремих частотах. Тому, доцільно для узгодженості різних даних знову скоротити кількість частотних каналів УТР-2, що використовуються в даному аналізі, до трьох частот (20 МГц, 25 МГц і 30 МГц) в кожному 3D кубі.

Рис. 2.8. Композитна часова серія з різницевих зображень SOHO / LASCO C2 і прямих зображень SDO / AIA (171 Å), на які було накладено положення максимумів радіовипромінювання, отримані по радіогеліограмам УТР-2 і з зображень NRH для яскравісної температури. Просторова еволюція джерел BЧ і HЧ частин сплеску IVs типу показана під час поширення KBM.

Рис. 2.8 являє набір різницевих зображень від SOHO / LASCO C2 і прямі спостереження SDO / AIA 171 Å. Ці композитні зображення формуються спільно з даними по радіозображенням наземних спостережень і за допомогою сонячних записів космічних апаратів. Послідовність зображень слід розглядати зверху вниз построчно зліва направо (кожне зображення має свій алфавітний символ). Легенда зображень дає список частот, на яких були зроблені ці виміри. Максимуми інтенсивності по геліограмам УТР-2 і по картах NRH відзначені спеціальними знаками (маркерами), щоб показати їх взаємне розташування. Лінії похибки розташування максимумів NRH помітно менше, ніж ширина відповідних маркерів. Що стосується геліограм УТР-2, помилки вимірювань HЧ радіоджерела визначаються розміром променя діаграми спрямованості антени. Рис. 2.8 (l) показує ширину променя УТР-2 по половинній потужності з кутовими розмірами  $25' \times 14.8'$ ,  $18.4' \times 17.7'$ ,  $22.0' \times 22.2'$ на частотах 20 МГц, 27.6 МГц і 30 МГц відповідно, для моменту часу 12:00:43 UT. Луч антени виглядає як еліпс, витягнутий уздовж *V*-координати. Кутові розміри ширини променя телескопа під час сесії спостережень на УТР-2 залишалися майже незмінними з незначними варіаціями. Середні значення ширини

променя становили 31.6'×23.8' (на 20 МГц), 25.3'×19.1' (на 25 МГц), 21.1'×15.9' (на ~30 МГц).

Зображення, отримані в цих вимірах і представлені на рис. 2.8, показують, що положення радіоджерела змінювалося під час руху КВМ від Сонця. Найбільш цікавою особливістю, показаної на даному малюнку, є те, що положення ВЧ і НЧ джерел утворюють лінію добре асоційовану з АО, яка породжує відповідний КВМ, незважаючи на деяке відхилення в південному напрямку НЧ частин сплеску в деякі моменти часу (див. панелі даного малюнка (a), (b), (e-h), та (n-q)). Це узгоджується з нашим припущенням, що джерела ВЧ і НЧ фізично пов'язані між собою. Спочатку обидва ВЧ і НЧ джерела були розташовані над АО, асоційованими з КВМ, що чітко показано на панелях (а) і (b) рис. 2.8. Максимуми інтенсивності НЧ радіоджерела на панелях (c), (d), а також частково на панелі (b) на частоті 30 МГц, переміщалися до тіла КВМ у напрямку до Сонця. Мал. 8 (e) показує дуже схожу структуру радіовипромінювання, як і на рис. 2.8 (a). Панелі (f) - (i) на рис. 2.8 показують підйом максимумів НЧ джерела, а також поступову зміну структури випромінювання від низхідної арочної форми до витягнутої в лінію в межах екваторіальної області Сонця. Остання конфігурація тривала ~ 40 хвилин, як видно з панелей (i) - (m) даного малюнка. Потім, положення максимумів НЧ джерела зазнали спуск по частоті в вигляді послідовності 30-25-20 МГц. Починаючи з рис. 2.8 (n) до рис. 2.8 (q) положення НЧ джерела на різних висотах змінювалися зі сходу в напрямку на південний схід. Слід зазначити, що положення максимумів інтенсивності для ВЧ і НЧ сплесків IVs типу на різних частотах демонструють дуже схожу поведінку в часі.

### 2.3. Обговорення отриманих результатів

НЧ радіовипромінювання IVs типу супроводжувалося ВЧ континуумом. Присутність останнього було впевнено підтверджено на картах NRH. Дані NRH дозволили отримати точний час ВЧ сплеску IVs типу. Є кілька переконливих аргументів вважати, що обидва сплески належать до випромінювання одного широкосмугового стаціонарного радіосплеску IV типу. Відсутність перехідного випромінювання між НЧ і ВЧ частинами в спектральних даних (див. рис. 2.2) можна пояснити наступними причинами. По-перше, це радіовипромінювання не виявляється на динамічному діапазоні RSTO (100-144 МГц) через низьку чутливість цього інструменту в цій смузі. По-друге, є пропуск даних в діпазоні 80-100 МГц через відсутність відповідних радіовимірів. Крім того, динамічний діапазон NDA показує видимий гострий край НЧ радіовипромінювання на частоті близько 65 МГц без очікуваного продовження до верхньої межі. Досить імовірно, що це пов'язано з специфікою схеми посилення в смузі частот NDA. Відомо, що нерівномірність частотної характеристики антени призводить до послаблення прийому сигналів на нижній і верхній межі робочої смуги частот спостереження. Таким чином, радіовипромінювання, що отримано на NDA вище 65 МГц, можливо, було подавлено таким антенним ефектом. На підтвердження того, що НЧ і ВЧ сплески IV типу мали спільне походження, слід зазначити, що існує дуже незначна ймовірність того, що два сплески IVs типу могли б існувати зовсім окремо, в один і той же час, в тому ж просторовому квадранті, а також показувати подібну еволюцію динаміки радіовипромінювальної структури в зображеннях.

Варіації інтенсивності, виявлені в декаметровій частини широкосмугового континууму IVs типу, можливо викликані кількістю енергійних електронів, а також еволюцією їх функції розподілу за швидкостями всередині радіовипромінювальної структури. Дотримуючись рис. 2.4, два горба в радіодіапазоні з'являються, коли відбуваються два спалахи С класу. Ймовірно, під час спалахів мало місце нова інжекція енергійних електронів в структуру, що випромінює. В результаті ми спостерігаємо два очевидних збільшення яскравості в радіопрофілях. Ці збільшення були виявлені завдяки вимірам на УТР-2, але вони не були зареєстровані іншими інструментами. Основна причина полягає в тому, що антенна решітка УТР-2 є найбільш чутливим інструментом серед тих, які використовуються в даній роботі.

На основі спостережень в радіодіапазоні зазвичай прийнято вважати, що сплески IVs типу проявляються протягом декількох хвилин після початку спалахів. Проте, даний випадок не підтримує таке загальне твердження. Відповідно до загального динамічним спектру (рис. 2.2) стаціонарний радіосплеск IV типу почався приблизно о 09:50 UT. Сонячний спалах класу C8.0 в рентгенівському випромінюванні мав пік за часом о 08:14 UT. Після цього настала тривала фаза спаду, що передує радіовипромінюванню IV типу. Затримка між часом піку спалаху і часом початку сплеску IV типу становила близько 2 годин. З цієї точки зору роль спалаху в ініціацію сплеску IV типу, здається, досить опосередкованою.

Слід зазначити, що існує ще один можливий сценарій для розвитку стаціонарних сплесків IV типу, який відноситься до КВМ. На відміну від спалахів, які показують відносно короткі характерні тривалості, КВМ є довгим процесом. Такі виверження також включають процеси, які здатні прискорювати електрони, що припадають на випромінювання IV типу. Наприклад, таке виверження може викликати ударну хвилю, що рухається вперед від Сонця, якщо це виверження відбувається досить швидко, або викликати магнітне перез'єднання уздовж токового шару після КВМ або уздовж деяких магнітних сепаратріс в межах або навколо такої еруптивної структури. Ми вважаємо, що

даний сценарій також грає певну роль і тут. Досить імовірно, що процес КВМ може викликати подальше прискорення і інжекцію енергійних електронів в структуру, що випромінює, IV типу (імовірно в структуру петлі), на додаток до тих, які були викликані спалахом C8.0 класу. Звернемо увагу, що даний спалах, що мав 1.5-годинну фазу спаду, могла безперервно вводити енергійні електрони в вищерозміщену магнітну структуру.

Попередньо ми вважаємо, що ВЧ і НЧ джерела IVs типу випромінювали з однієї високолежачої петлі з основанням розташованим в околиці АО, з якої виникало КВМ. Ця петля може бути окреслена шляхом нанесення положення ВЧ і НЧ джерел, як показано на рис. 2.8. Вимірювання NRH показують рух ВЧ джерела радіовипромінювання всередині магнітної петлі поблизу її основання. Геліографічна зображення УТР-2 показують дуже подібні риси, але тільки вище, у зовнішній короні. Згідно радіозображень УТР-2 висоти в короні для частот 20 МГц, 25 МГц, 30 МГц становили близько 4.5RS, 3.9RS, і 3.0RS, відповідно. Відхилення в південному напрямку, підйом і спуск в русі може свідчити про реакцію передбачуваної структури петлі на збурення, викликані КВМ, включаючи динамічне зміщення структури і зміна рівнів внутрішньої щільності або турбулентності, які могли б вплинути на інтенсивність і частоту випромінювання.

## 2.4. Висновки до розділу.

У даній роботі детально представлені геліографічні спостереження стаціонарного радіовипромінювання IV типу на найнижчих частотах (близьких до частоти іоносферного відсічення). В основу даного дослідження були покладені сонячні спектральні вимірювання і побудова зображень, отриманих за допомогою радіотелескопу УТР-2 в діапазоні частот 16.5-33.0 МГц. Спектральний аналіз радіовипромінювання IVs типу був доповнений одночасно виміряними радіоданими на більш високих частотах, які спостерігалися такими інструментами як NDA (33.0-80.0 МГц), е-Callisto (100-144 МГц) і ORFEES (144-450 МГц). Все це дозволяє нам вивчити багато аспектів складної події 6 вересня 2014 року, в особливості просторові характеристики і динамічну еволюцію радіоджерел сплесків IVs типу.

В результаті цієї роботи встановлено, що сплески IVs типу мають дві компоненти, високих і низьких тонів. НЧ декаметровий континуум IVs типу мав двогорбу форму профілів радіоінтенсівності, яка корелювала з часом з появою двох слабких сонячних спалахів з активної області, пов'язаної з КВМ. При цьому було встановлено, що початковий і кінцевий час високих і низьких тонів сплесків IVs типу дуже близькі один до одного. Крім того, згідно з виміряним зображень NRH і УТР-2 радіоджерела обох компонентів показують просторово корельований рух разом з розвитком КВМ. На підставі цих спостережень, ми можемо припустити, що ВЧ і НЧ джерела з'єднані високолежачою структурою типу магнітної петлі, одне з основань якої розташовується в активній області, таким чином, дозволяючи енергійним інжектованим в петлю електронам прискорюватися під час спалахів і утримуватися в пастці. Ми вважаємо, що динамічний рух радіоджерел є відгуком петлі на збурення, що викликані КВМ.

Це дослідження демонструє великий потенціал у використанні недавно модернізований антеною решітки УТР-2, що дозволило вперше виявити просторову еволюцію радіосплесків IV типу в декаметровому діапазоні довжин хвиль.

### Література до розділу

2.1. Wild J.P., Smerd S.F., Weiss A.A. Solar Bursts // Annual Review of Astronomy and Astrophysics. – 1963. – Vol. 1. – P. 291-366.

2.2. Stewart R.T. Moving Type IV bursts // in Solar Radiophysics: Studies of Emission from the Sun at Metre Wavelengths, ed. D.J. McLean, N.R. Labrum. – Cambridge: Cambridge University Press, 1985. – P. 361-383.

2.3. Melnik V.N., Rucker H.O., Konovalenko A.A., et al. Solar Type IV Bursts at Frequencies 10-30 MHz // in Sol. Phys. Res. Trends, ed. Pingzhi Wang. – New York: Nova Science Publishers, 2008. – P. 287-325.

2.4. Zaqarashvili T.V., Melnik V.N., Brazhenko A.I., et al. Radio Seismology of the Outer Solar Corona // Astron. Astrophys. – 2013. – Vol. 555. – id.A55. – P. 1-12.

2.5. Zlotnik E.Ya. Origin of Zebra Pattern in Type IV Solar Radio Emission // Cent. Eur. Astrophys. Bull. – 2009. – Vol. 33. – P. 281-298.

2.6. Boischot A. Caractères d'un type d'émission hertzienne associé à certaines éruptions chromosphériques // C. R. Acad. Sci. – 1957. –Vol. 244. – P. 1326-1329.

2.7. Weiss A.A. The Type IV Solar Radio Burst at Metre Wavelengths // Australian Journal of Physics. – 1963. – Vol. 16. – P. 526-544.

2.8. Robinson R.D. Flare Continuum // in Solar Radiophysics: Studies of Emission from the Sun at Metre Wavelengths, ed. D.J. McLean, N.R. Labrum. – Cambridge: Cambridge University Press, 1985. – P. 385-414.

2.9. Gergely T.E., Kundu M.R. Decameter Type IV Bursts Associated with Coronal Transients // Solar Phys. – 1974. – Vol. 34. – P. 433-446.

2.10. Robinson R.D. Multiple-Frequency Measurements of a Flare Continuum Event // Proc. Astron. Soc. Australia. – 1982. – Vol. 4. – P. 389-392.

2.11. Ramesh R., Kishore P., Mulay S.M., et al. Low-Frequency Observations of Drifting, Non-thermal Continuum Radio Emission Associated with the Solar Coronal Mass Ejections// Astrophys. J. – 2013. – Vol. 778. – id. 30. – P. 1-8.

2.12. Sasikumar Raja K., Ramesh R., Hariharan K., et al. An Estimate of the Magnetic Field Strength Associated with a Solar Coronal Mass Ejection from Low Frequency Radio Observations // Astrophys. J. – 2014. – Vol. 796. – id. 56. – P. 1-7.

2.13. Braude S. Ya., Megn A. V., Ryabov B. P., Sharykin N. K., Zhouck I. N. Decametric survey of discrete sources in the Northern sky. I - The UTR-2 radio telescope: Experimental techniques and data processing // Astrophys. Space Sci. – 1978. – Vol. 54. – P. 3-36.

2.14. Konovalenko A. A., Stanislavsky A. A., Rucker H. O., et al. Synchronized Observations by Using the STEREO and the Largest Ground-Based Decametre Radio Telescope // Exper. Astron. – 2013. – Vol. 36. – P. 137-154.

2.15. Boiko A. I., Melnik V. N., Konovalenko A. A., et al. Decametric Radio Bursts Associated with the 13 July 2004 CME Event at Frequencies 10-30 MHz // Advances in Astronomy and Space Physics. – 2012. – Vol. 2. – P. 76-78.

2.16. Wuelser J.-P., Lemen J.R., Tarbell T.D., et al. EUVI: the STEREO-SECCHI Extreme Ultraviolet Imager // Proc. SPIE. – 2004. – Vol. 5171. – P. 111-122.

2.17. Lemen J.R., Title A.M., Akin D.J., et al. The Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO) // Solar Phys. – 2012. – Vol. 275. – P. 17-40.

2.18. Dere K. P., Moses J. D., Delaboudiniere J.-P., et al. The Preflight Photometric Calibration of the Extreme-Ultraviolet Imaging Telescope EIT \\ Solar Phys. – 2000. – Vol. 195. – P. 13-44.

2.19. van Haarlem M. P., Wise M. W., Gunst A. W., et al. LOFAR: The LOw-Frequency ARray // Astron. Astrophys. – 2013. – Vol. 556. – id. A2. – P. 1-53.

2.20. Tingay S.J., Oberoi D., Cairns I., et al. The Murchison Widefield Array: solar science with the low frequency SKA Precursor \\ J. Phys. Conf. Ser. – 2013. – Vol. 440. – id. 012033.

2.21. Ramesh R., Kathiravan C., Kartha S.S., Gopalswamy N. Radioheliograph Observations of Metric Type II Bursts and the Kinematics of Coronal Mass Ejections \\ Astrophys. J. – 2010. – Vol. 712. – P. 188-193.

2.22. Kong X.L., Chen Y., Li G., et al. A Broken Solar Type II Radio Burst Induced by a Coronal Shock Propagating across the Streamer Boundary // Astrophys. J. – 2012. – Vol. 750. – id. 158. – P. 1-7.

2.23. Feng S. W., Chen Y., Kong X.L., et al. Radio Signatures of Coronal-mass-ejection– Streamer Interaction and Source Diagnostics of Type II Radio Burst // Astrophys. J. – 2012. – Vol. 753. – id. 21. – P. 1-6.

2.24. Carley E. P., Long D. M., Byrne J. P., et al. Quasiperiodic Acceleration of Electrons by a Plasmoid-Driven Shock in the Solar Atmosphere // Nature Physics. – 2013. – Vol. 9. – P. 811-816.

2.25. Feng S. W., Chen Y., Kong X.L., et al. Diagnostics on the Source Properties of a Type II Radio Burst with Spectral Bumps // Astrophys. J. – 2013. – Vol. 767. – id. 29. – P. 1-8.

2.26. Zucca P., Pick M., Demoulin, P., et al. Understanding Coronal Mass Ejections and Associated Shocks in the Solar Corona by Merging Multiwavelength Observations // Astrophys. J. – 2013. – Vol. 795. – id. 68. – P.

2.27. Chen Y., Du G. H., Feng L., et al. A Solar Type II Radio Burst from Coronal Mass Ejection-Coronal Ray Interaction: Simultaneous Radio and Extreme Ultraviolet Imaging // Astrophys. J. – 2014. – Vol. 787. – id. 59. – P. 1-7.

2.28. Feng S. W., Du G. H., Chen Y., et al. Simultaneous Radio and EUV Imaging of a Multilane Coronal Type II Radio Burst // Solar Phys. – 2015. – Vol. 290. – P. 1195-1205.

2.29. Morosan D.E., Gallagher P.T., Zucca P., et al. LOFAR Tied-Array Imaging of Type III Solar Radio Bursts // Astron. Astrophys. – 2014. – Vol. 568. – id. A67. – P. 1-8.

2.30. Morosan D.E., Gallagher P.T., Zucca P., et al. LOFAR Tied-Array Imaging and Spectroscopy of Solar S Bursts // Astron. Astrophys. – 2015. – Vol. 580. – id. A65. – P. 1-6.

2.31. Bain H. M., Krucker S., Saint-Hilaire P., Raftery C. L. Radio Imaging of a Type IVM Radio Burst on the 14th of August 2010 // Astrophys. J. – 2014. – 782. – id. 43. – P. 1-12.

2.32. Stanislavsky A.A., Abranin E.P., Konovalenko A.A., Koval A.A. Heliograph of the UTR-2 Radio Telescope. I. General Scheme // Radio Physics and Radio Astronomy. – 2011. – Vol. 2. – P. 197-204.

2.33. Abranin E. P., Stanislavsky A. A., Koval A. A., Konovalenko A. A. Heliograph of the UTR-2 Radio Telescope. II. Design Features // Radio Physics and Radio Astronomy. – 2011. – Vol. 2. – P. 299-305.

2.34. Stanislavsky A.A., Koval A.A., Konovalenko A.A. Low-Frequency Heliographic Observations of the Quiet Sun Corona // Astronomische Nachrichten. – 2013. – Vol. 334. – P. 1086-1092.

2.35. Ryabov V. B., Vavriv D. M., Zarka P., et al. A Low-Noise, High-Dynamic-Range, Digital Receiver for Radio Astronomy Applications: an Efficient Solution for Observing Radio-Bursts from Jupiter, the Sun, Pulsars, and Other Astrophysical Plasmas Below 30 MHz // Astron. Astrophys. – 2010– Vol. 510. – id. A16. – P. 1-13.

2.36. Lecacheux A. The Nançay Decameter Array: A Useful Step Towards Giant, New Generation Radio Telescopes for Long Wavelength Radio Astronomy // in Radio Astronomy at Long Wavelengths, ed. R.G. Stone et al. – Geophysical Monograph Series, Vol. 119. – Washington, DC: AGU, 2000. – P. 321-328.

2.37. Kerdraon A., Delouis J.-M. The Nançay Radioheliograph // Coronal Physics from Radio and Space Observations, Lecture Notes in Physics. – 1997. – Vol. 483. – P. 192-201.

2.38. Melnik V.N., Brazhenko A. I., Konovalenko A. A., et al. Decameter Type III Bursts with Changing Frequency Drift-Rate Signs // Solar Phys. – 2015. – Vol. 290. – P. 193-203.

# РОЗДІЛ З. ДОСЛІДЖЕННЯ РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ БЛИСКАВОК В АТМОСФЕРІ САТУРНА.

Блискавки на планетах Сонячної системи (крім Землі) було відкрито за допомогою космічних апаратів (КА) на рубежі 80-х років минулого століття. Наземні спостереження блискавок на Сатурні, стали регулярними після першого успішного їх детектування [3.1, 3.2] на радіотелескопі УТР-2 [3.3] і підтвердження шляхом порівняння з даними супутника Кассіні [3.4].

## 3.1. Гігантський шторм на Сатурні.

Електростатичні розряди на Сатурні (Saturn Electrostatic Discharges – SED), які пов'язані зі штормами, були набагато більш поширені в роки навколо рівнодення Сатурна (вересень 2009 р.). З листопада 2007 року по травень 2011 року вони були присутні 69% часу, що близько 10 разів більше в порівнянні з першими роками (2003-2007 роки) перебування КА Кассіні на орбіті Сатурна [3.6]. В цей час відбувся найбільший з відомих до цих пір шторм. Почався він в грудні 2010 року і тривав біля восьми місяців. Гігантський шторм дозволив дослідити явище SED з безпрецедентною часовою роздільною здатністю як завдяки великій кількості розрядів і їх високої інтенсивності, так і високою ефективною площею і модернізованому приймальному обладнанню радіотелескопа УТР-2 [3.7].

## 3.2. Апаратура і спостереження.

Спостереження шторму проводилися на радіотелескопі УТР-2 з 21 по 27 грудня 2010 року. Було проведено сім сеансів запису грозової активності на Сатурні. Радіотелескоп має п'ять променів, рознесених в просторі з кроком 24' (на частоті 25 МГц) в напрямку з Півдня на Північ. Це дозволяє забезпечити "ON-OFF" режим [3.4, 3.5], коли центральний промінь (ON) спрямований на джерело, а максимально відведений (в напрямку на Північ на ≅1°) спрямований на опорну ділянку неба (OFF). Такий режим дає можливість значно послабити вплив завад завдяки відніманню результатів обробки опорного каналу з центрального. Режим "ON-OFF" був реалізований за допомогою двох приймачів DSPZ [3.8, 3.9], синхронізованих по сигналу секунди від рубідієвого стандарту. Приймачі були включені в режимі кореляції. Цей режим після он-лайн FFT-обробки має 4 вихідних потоки даних:

- автоспектр антени «Північ-Південь» радіотелескопа УТР-2 S1(f) (Fast Fourier Transform – FFT від послідовності часових відліків першого каналу цифрового приймача s1(t)),
- автоспектр антени «Захід-Схід» S2(f),
- реальна частина крос-спектра цих антен: Re(S1·S2\*)
- і уявна частина: Im(S1·S2\*).

Вони дозволяють аналізувати різні характеристики сигналу: модуль, фазу, реальну частину твору спектрів і т.п. Фазовий динамічний спектр в ряді випадків буває корисний для розрізнення перешкод, які проникли по бічних пелюстках і сигналу космічного джерела, що приходить з головного напрямку діаграми спрямованості. Це один з ряду способів виділення сигналів блискавок на тлі перешкод, опису яких буде присвячений окремий підрозділ роботи. Часова роздільна здатність ( $\Delta t$ ) цих приймачів дорівнювала 10 мс. Частотний діапазон 16.5-33.0 МГц був розбитий на 4096 парціальних каналів з шириною кожного близько 4 кГц.

Крім того, додатково в канал «ON» був включений ще один приймач, що працює в режимі waveform. Це дозволило вперше провести записи SED з часовою роздільною здатністю  $\Delta t \cong 15$  нс (1/66 МГц). АЦП приймача має 16-біт. Слід зазначити, що висока ефективна площа УТР-2, широкосмугова підсилювальна система [3.10], модернізовані комутаторні пристрої [3.11] дозволяють отримати високу миттєву чутливість, і вперше отримати записи часової структури SED з  $\Delta t$  до часток мікросекунди. Використовувалися фільтри(зі смугою 8-32 МГц) одного каналу waveform-приймача "основної смуги" (від постійного струму до частоти Найквіста) з верхньою частотою 33.0 МГц На нього підводилася сума сигналів антен «С-Ю» і «З-В» для максимізації ефективної площі ( $A_E$ ). При цьому чутливість радіотелескопу на рівні одного середньоквадратичного відхилення ( $\sigma$ ) дорівнює

$$\sigma = 2kT/(A_E(\Delta f \Delta t)^{0.5}) \tag{3.1}$$

де k – константа Больцмана, T – сумарна температура системи і яскравісної температури ділянки неба в напрямку на джерело,  $\Delta f$  - ширина частотної смуги спостережень,  $\Delta t$  – часова роздільна здатність, яка може змінюватися в широких межах. При T = 30000 K,  $A_E$ = 75000 м<sup>2</sup> (взяту з урахуванням положення джерела: схилення Сатурна в сесії спостережень складало біля –4°),  $\Delta f$  = 16 МГц и  $\Delta t$  = 10 мс  $\sigma$  = 2.76 Ян. При  $\Delta t$  = 1 мкс  $\sigma$  = 276 Ян, що досить для виявлення сплесків, подібних тим, які реєструвалися під час штормів Е (2006 р.) і F (2007 р.) [3.2, 3.4, 3.5].

Записи в режимі кореляції проводилися щоночі протягом всього часу, коли Сатурн був доступний для спостережень за допомогою радіотелескопу УТР-2 (приблизно з 0:30 по 7:00 UT). Через обмеження дискового простору в waveform режимі (який має потік даних ≈0.5 Тб/год) з 21 по 24 грудня проводилися записи по 1.5 - 2 години тільки під час очікуваної штормової активності. 25-го числа був проведений короткий контрольний запис, коли очікувалося, що шторм буде за лімбом планети. Однак, при великому розмірі шторму [3.12] частина шторму (джерело SED) могла в цей час ще не сховатись за радіогоризонтом. На рис.3.1 наведено розклад сеансів спостережень з урахуванням положення Сатурна і шторму на його лімбі. Чорні прямокутники ("Saturn") показують час, протягом якого Сатурн можна було спостерігати на УТР-2, помаранчеві прямокутники ("Storm") показують часові інтервали, коли «голова» шторму була доступна для спостережень із Землі. Блакитні прямокутники ("Corr") показують час запису в кореляційному режимі приймачами в променях «ON» і «OFF», зелені прямокутники ("WF / Sp") показують час запису в режимах waveform або спектрів з роздільною здатністю 2 мс (цей режим використовувався один раз 27-го грудня 2010 року та, оскільки він виявився неінформативним, в даній роботі цей режим обговорюватися не буде). Також на малюнку вказано час, коли рівень радіозавад істотно зростав (великі блакитно-зелені прямокутники "high RFI level"), що пов'язано з денними годинами в місці розташування радіотелескопу. 25-го грудня в запису існують три пропуску приблизно по 25 хвилин, пов'язаних з некоректною роботою системи наведення радіотелескопа.



Рис. 3.1. Часова діаграма спостережень шторму Ј в грудні 2010 року. Сатурн над горизонтом (чорний), Storm на лімбі Сатурна (помаранчевий), час запису в режимі кореляції (синій), час запису в режимі waveform і в режимі автоспектр з роздільною здатністю 2 мс (зелений). Денний час, при якому рівень RFI істотно зростає, показано великими блакитно-зеленими прямокутниками.

Всього було записано близько 7 Тб даних (більше 5 Тб становлять дані, записані в waveform режимі). Аналіз даних складався з декількох етапів і був різний для різних режимів. Оскільки чутливість при часовій роздільній здатності 10 мс у відповідності з (1) значно вище, ніж в режимі waveform (15 нс), і запис в кореляційному режимі тривав весь доступний для спостереження епізоду шторму час, то обробка цих даних в першу чергу дозволила як показати картину штормової активності протягом сеансу запису в цілому, так і вказати для записів в режимі waveform досить точні часові інтервали для аналізу. Це корисно, оскільки пошук спорадичного випромінювання в великому обсязі даних з високою роздільною здатністю вимагає великих часових і обчислювальних витрат.

Дані каналів «ON» і «OFF» очищалися від вузькосмугових і потужних широкосмугових перешкод (рівень обмеження для широкосмугових перешкод був завідомо вище можливих піків випромінювання SED) процедурою, подібно описаній в [3.5]. Одночасно проводилося нормування на знайдене середнє значення сигналу в кожному з каналів. Часова прив'язка кожного приймача до сигналу секунди дозволяла перевірити і відкоригувати в разі необхідності часову прив'язку записів в різних приймачах. Після цього проводилося віднімання сигналів каналів ON і OFF для компенсації радіозавад (рис. 3.2).



Рис. 3.2. Компенсація радіозавад завдяки відніманню ON і OFF каналів.

При візуальній інспекції також видалялись області запису, які повністю були уражені завадами (рис. 3.3 – білий відрізок на верхній спектрограмі). Оброблені таким чином спектрограми приводилися до бажаного підсумкового часового і частотного розділення. На тому ж рисунку наведено приклад обробки запису одного з сеансів спостережень з більш детальним зображенням виділеної ділянки.



Рис. 3.3. Приклад запису від 24 грудня 2010 року. Вгорі наведено весь сеанс запису, на нижній панелі – виділена ділянка (3D і спектрограма).

Після цього був створений каталог блискавок із зазначенням епохи старту файлу (в юліанських днях – JD), С/Ш у парціальній смузі (128 смуг з  $\Delta f \cong 129$  кГц), часу події і номера спектру від початку файлу. При цьому набір одночасно існуючих точок спектрограми з перевищенням фону фіксувалися, як SED тільки при виконанні наступних умов:

перевищення відліку для попередньо очищених від перешкод даних парціального каналу (за методикою, описаної в [3.5]) становить > 4 σ;

кількість субсмуг, в яких одночасно існує необхідне перевищення дорівнює 7 і більше (критерій достатньої широкосмуговості);

щільність подій в діапазоні 16.5-30 МГц вище більш ніж в 1.5 рази щільності подій в діапазоні 30-33 МГц (це вимога обумовлена необхідністю очищення спектрограм від потужних широкосмугових джерел електромагнітних полів, які на відміну від SED мають плоский спектр).

Ці дані дозволяють отримати гістограми розподілу подій по тривалості, оцінити спектр прийнятих сигналів блискавок, а також прицільно знайти ділянки запису, в яких присутні сигнали SED, для їх подальшої ідентифікації в даних приймача waveform. Для даних з  $\Delta t \cong 15$  не співвідношення С/Ш перераховується виходячи з обраної для подальшої обробки ЧРЗ. У роботі [3.13] зазначено, що блискавка має складну структуру: мілісекундну, субмілісекундну і мікросекундну. Для детектування відповідних структур при обробці сигналів використовується різна ЧРЗ. Наприклад, для грубої оцінки міри дисперсії (МД) у субмілісекундній структурі з ЧРЗ  $\Delta t \cong 8$  мкс використовується постдетекторний метод компенсації затримки. При цьому програш в чутливості у відповідність з (3.1), по відношення до  $\Delta t = 10$  мс становить  $\cong 35$  разів. Після дедиспергування проводиться аналіз субмілісекундної структури. Точний підбір МД проводиться вже з використанням когерентного дедиспергування по максимально інтенсивним сплескам (існують в обмеженій кількості блискавок). Після підбору МД аналізується пікова інтенсивність розрядів і може бути побудований як високочастотний спектр самих розрядів, так і оціночний низькочастотний спектр блискавок.

## 3.3. Створення каталогу блискавок і визначення їх параметрів.

В результаті обробки даних за всю сесію спостережень було отримано кілька тисяч спектрів, що містять блискавки. Критерієм відбору спектрів як таких, що належать блискавці, було перевищення порога  $4\sigma$  в субсмузі при одночасній наявності не менше 7 подій в будь-яких – суміжних або ні – субсмугах. Сумарна смуга при цьому складала близько 1 МГц. Приклад маркування таких спектрів показано на рис. 3.4. Червоним кольором відмічені спектри, які вдовольнили критеріям відбору. Синім кольором – точки в спектрограмі, які не задовольняють набору критеріїв, які описані в розділі 3.2.



Рис. 3.4. Спектрограма з виділеними кольором блискавками (червоний – задовольняють критеріям відбору, синій – не задовольняють по критеріям широкосмуговості).

Разом із зображеннями зберігається текстова та бінарна форма представлення спектрів продетектованих блискавок. На рис. 3.5 показано звіт роботи програми детектування – і, одночасно, фрагмент каталогу – з значеннями абсолютного часу, співвідношення С/Ш, середньої частоти каналу та часу від початку файлу (четвертий стовпчик – номер спектру).

picture 16	iof 1	6	
Tue Nov 24 10:37:18 2016			
detected events: 22			
SNR: Freq : time:			
4.04646	18.3594	7131.53	718202
5.32318	18.4922	7131.53	718202
4.42801	18.8906	7131.53	718202
5.17725	19.1563	7131.53	718202
7.70903	19.2891	7131.53	718202
5.10452	19.4219	7131.53	718202
6.87679	19.5547	7131.53	718202
5.39813	19.6875	7131.53	718202
7.76181	19.8203	7131.53	718202
7.64687	19.9531	7131.53	718202
5.17031	20.2188	7131.53	718202
4.74355	20.3516	7131.53	718202
5.58791	20.4844	7131.53	718202
5.00021	20.7500	7131.53	718202
4.11484	21.1484	7131.53	718202
4.36282	18.2266	7151.47	720210
5.05013	21.4141	7151.47	720210
8.40277	21.9453	7151.47	720210
5.58939	22.7422	7151.47	720210
4.44261	23.1406	7151.47	720210
4.29375	24.3359	7151.47	720210
5.65439	24.4688	7151.47	720210
finished pict: 16/16 in		1.4370000sec	
finished frame number:		11	

Рис. 3.5. Фрагмент текстового файлу каталогу блискавок, що побудовано на основі даних з  $\Delta t = 10$  мс.

Ці дані дозволили отримати ряд характеристик SED за період 21-25 грудень 2010р. Для отримання деяких з них, наприклад, розподілу блискавок по тривалості і e-folding time (характерний час падіння кількості блискавок в e разів) досить було самих вихідних даних, що містять час події, номер каналу і перевищення С/Ш. Для визначення інших параметрів вихідні дані обробки використовувалися, як «маска», по якій з даних обирались вихідні спектри окремих антен (наприклад для визначення щільності потоку випромінювання), а також були залучені додаткові дані, такі, як температура галактичного фону [3.14], калібрувальні дані УТР-2 і т.д.

## Розподіл блискавок по тривалості і e-folding time.

Послідовно (без розриву) продетектовані події вважалися (як було прийнято і в попередніх роботах) належними одній блискавці. Розподіл за тривалістю для кожного дня і сумарний наведені на рис. 3.6.



Рис 3.6. Гістограми розподілу блискавок за тривалістю для кожного дня (21-25 грудня) і проінтегровані за всю сесію спостережень.

### Спектр блискавок.

Також з цих даних було отримано нормований (але не калібрований) спектр блискавок. Оскільки однією з характеристик є спектральний індекс широкосмугового сигналу SED, його визначення потребує достатньої точності вимірювання потоку при максимальному розносі частот (19-31 МГц). Для цього – у порівнянні з рутинним калібруванням УТР-2 – потрібно врахувати затухання в найбільших по довжині фазообертачах при значних відхиленнях від зеніту (зенітний кут під час стеження змінювався в межах від 54 до 72 градусів). Також при великих зенітних кутах на частотах вище 23-24 МГц з'являється дифракційна пелюстка. Всі ці ефекти призводять до додаткового зниження ефективної площі. Тобто реальний спектральний індекс (по модулю) буде дещо меншим, ніж можна розрахувати безпосередньо з даних приймачів. Більш точні обчислення будуть зроблені після закінчення робіт з калібрування УТР-2. Але спектри блискавок для кожного сеансу спостережень був обчислені відносно галактичного тла. На рис. 3.7 показано нормований спектр блискавок за п'ять сеансів спостережень і їх сумарний спектр.



Рис.3.7. Нормований спектр блискавок за 21-25 грудня і їх середній спектр.

### Тонка часова структура блискавок

Вимірювання параметрів SED, що описані вище та ті, які проводяться за допомогою КА мають дуже невисоку часову роздільну здатність – від десяти мілісекунд. УТР-2 та наявне приймальне обладнання дозволило проводити дослідження структури електростатичних розрядів на Сатурні з найвищою доступною часовою роздільною здатністю (15 нс). В ході виконання цієї роботи було описано відкриття складної часової структура розрядів [3.13], а також виміряно час дисперсійного запізнювання, що є характеристикою середовища поширення радіовипромінювання від місця виникнення блискавок до земного спостерігача. На рис. 3.8 показані різні часові масштаби блискавок: субмілісекундний – на верхній панелі та мікросекундний – на середній. Виявилось, що основна енергія SED зосереджена в субмілісекундній структурі (характерна тривалість сплесків 30-300 мкс), що дозволяє по дуже добре окресленому фронту сплесків, вимірюючи дисперсійну затримку, дуже точно визначити міру дисперсії в середовищі розповсюдження (вона становить (2-7)·10<sup>-5</sup> пк/см<sup>3</sup>).



Рис. 3.8. Різноманітні часові масштаби блискавок в атмосфері Сатурна: субмілісекундні (верхня панель) та мікросекундні (середня панель) компоненти на динамічних спектрах і результат накопичення по частоті після усунення дисперсійної затримки в середовищі розповсюдження сигналу (нижня панель). Каталог цих сплесків потребує обробки великого масиву даних і знаходиться в стадії підготовки.

### 3.4. Висновки до розділу.

Завдяки високій ефективній площі радіотелескопа УТР-2 і, як наслідок, можливості встановлювати високу часову роздільну здатність в цифрових приймачах, були вперше зареєстровані субмиілісекундна і мікросекундна структури в записах блискавок в атмосфері Сатурна. Запис даних з різною часовою роздільною здатністю дозволив виділити і велику кількість слабких розрядів (дані внесені до каталогу), і достатню кількість потужних короткотривалих (долі мілісекунд) сплесків, які дозволяють проаналізувати дисперсійну затримку в міжпланетному середовищі.

### Література до розділу

3.1. Konovalenko A., Lecacheux A, Rucker H., et al., Ground-based decameter wavelength observations of Saturn electrostatic discharges, European Planetary Science Congress 2006, EPSC2006-A-00229, 2006.

3.2. Konovalenko A. A., Kalinichenko N. N., Rucker H. O. et al. Earliest recorded ground-based

decameter wavelength observations of Saturn's lightning during the giant E-storm detected by Cassini spacecraft in early 2006 // Icarus. – 2013. – Vol. 224, No. 1. – P. 14–23.

3.3. Брауде С. Я., Мень А. В., Содин Л. Г. Радиотелескоп декаметрового диапазона волн УТР-2 // Антенны – Москва: Связь, 1978. – №26. – С. 3–15.

3.4. Захаренко В.В., Милостная К.Ю., Фишер Г. и др. Идентификация молний на Сатурне, зарегистрированных радиотелескопом УТР–2 и космическим аппаратом "Кассини" // Радиофизика и Радиоастрономия. – 2010. – Т.15. – С. 361–368.

3.5. Захаренко, 2012 Zakharenko, V., Mylostna, C., Konovalenko, A., et al.: Ground-based and spacecraft observations of lightning activity on Saturn. Planet. Space Sci. 2012. Vol. 61, P. 53–59.

3.6. Fischer G., Kurth W. S., Gurnett D. A. et al. A giant thunderstorm on Saturn // Nature. – 2011. – Vol. 475, No. 7354. – P. 75–77.

3.7. Konovalenko A., Sodin L., Zakharenko V. et al. The modern radio astronomy network in Ukraine: UTR-2, URAN and GURT. Experimental Astronomy. 2016, Vol. 42, Is. 1, pp. 11–48.
3.8. Kozhin R. V., Vynogradov V. V., and Vavriv D. M. Low-noise, high dynamic range digital receiver/spectrometer for radio astronomy applications // Proc. SMW'07 Symposium. – Kharkiv (Ukraine). – 2007. – P. 736–738.

3.9. Ryabov, V.B., Vavriv, D.M., Zarka, P., et al.: A low-noise, high dynamic range digital receiver for radio astronomy applications: an efficient solution for observing radio-bursts from Jupiter, the Sun, pulsars and other astrophysical plasmas below 30 MHz. Astron. Astrophys. 2010. Vol. 510, P. 16–28.

3.10. Abranin E.P., Bruck Yu.M., Zakharenko V.V., Konovalenko A.A. The New Preamplification System for the UTR-2 Radio Telescope. Part 1: Circuit Analysis and Design.

Part 2. Implementation and Test Operation. Experimental Astronomy // Experimental Astronomy. – 2001. – Vol. 11.– P. 85–112.

3.11. Zakharenko V.V., Sharykin N.K., Rudavin E.R. Modernization of Commutation Devices and an Improvement of Main Parameters of the UTR–2 Radio Telescope // Kinem. Ph. Cel. Bod. Suppl. Ser. – 2005.– No. 5. – P. 90–92.

3.12. Sayanagi K.M, Dyudina U.A., Ewald S.P. et al. Dynamics of Saturn's great storm of 2010–2011 from Cassini ISS and RPWS, Icarus, V.223, 2013, P.460–478.

3.13. Милостная К. Ю. Захаренко В. В., Коноваленко А. А. и др. Тонкая временная структура молний на Сатурне / К.Ю. Милостная, // Радиофизика и радиоастрономия. – 2014. – Т. 19, № 1. – С. 10-19.

3.14. Sidorchuk M. A., Ulyanov O. M., Shepelev V. A. et al. 2008, in ScientificWorkshop– Astrophysics with E-LOFAR. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.hs.unihamburg. de/DE/Ins/Lofar/lofar workshop/poster abstracts.html#poster27

# РОЗДІЛ 4. КОМПЛЕКСНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СОНЯЧНОГО ВІТРУ ТА ГЕОЕФЕКТИВНИХ ПРОЯВІВ СОНЯЧНОЇ АКТИВНОСТІ.

Вплив сонячного вітру на земні процеси є дуже різноманітним. Дослідження за допомогою спостереження мерехтінь точкових космічних джерел дозволяє визначати структуру потоків сонячного вітру і їх параметри як при малих, так і при великих елонгаціях, що важливо при дослідженні ближнього космосу і для різноманітних космічних місій. Вимірювання потоків частинок, магнітного і електричного поля, інших параметрів середовища від іоносфери аж до земної поверхні одночасно зі спостереженнями випромінювання сонця в дуже широкому діапазоні довжин хвиль як наземними, так і космічними телескопами дозволяє глибше зрозуміти сонячно-земні зв'язки та передбачати космічну погоду.

## 4.1.Методика встановлення потокової структури сонячного вітру за орбітою Землі

Сонячний вітер - це потік іонізованих часток, що витікає з сонячної корони із швидкістю 300 - 2000 км/с в навколишній космічний простір і заповнює гігантський об'єм радіусом близько 100 а. о., який прийнято називати Геліосферою. Багаторічні супутникові спостереження показали, що сонячний вітер структурований і зазвичай ділиться на спокійний і збурений (спорадичний і рекурентний). Залежно від швидкості, спокійні потоки сонячного вітру діляться на два класи: повільні (приблизно 300-500 км/с біля орбіти Землі) і швидкі (500-800 км/с біля орбіти Землі). Іноді до стаціонарного вітру відносять область Геліосферного токового шару, який розділяє області різної полярності міжпланетного магнітного поля, і за своїми характеристиками близький до повільного сонячного вітру.

З багатьох точок зору (фізики сонячного вітру, прогнозу космічної погоди і т. і.) безумовний інтерес становить можливість встановлення потокової структури сонячного вітру. На цьому етапі виконання НДР "Сансі" була розроблена методика встановлення потокової структури сонячного вітру за орбітою Землі [4.1]. Було обгрунтовано можливість застосування методу фейнманівских інтегралів по траєкторіях для інтерпретації спостережень мерехтінь космічних радіоджерел декаметрового діапазону на неоднорідностях міжпланетної плазми при великих кутах елонгації і отримано вираз для енергетичного спектру мерехтінь:

$$W(f) \approx 2\pi^{2} I_{0}^{2} \frac{l\omega_{p}^{4}}{(c\omega)^{2}} \int_{0}^{1} d\zeta \int_{a}^{\infty} \kappa_{\perp} d\kappa_{\perp} \left[1 - \cos\left(\kappa_{\perp}^{2} l\zeta c / \omega\right)\right] \times \\ \times \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\kappa_{\perp} l\zeta \theta\right)^{2}\right] \frac{\Phi_{N}(\kappa_{\perp}, 0, \zeta)}{\left[\zeta \left(\kappa_{\perp}^{2} V_{\perp}^{2} - 4\pi^{2} f^{2}\right)\right]^{1/2}} .$$

$$(4.1)$$

Просторовий спектр неоднорідностей електронної концентрації  $\Phi_N(\kappa_{\perp},0,\zeta)$  приймається ступеневим та ізотропним:

$$\Phi_N(\kappa_{\perp},0,\zeta) \propto \sigma_N^2(\zeta) \exp(-\kappa_{\perp}^2 l_0^2) L_0^{3-n} \kappa_{\perp}^{-n}.$$

Тут  $\omega = 2\pi f_0$ ,  $f_0$  - частота радіовипромінювання,  $\omega_p -$ плазмова частота,  $a = 2\pi f / V_{\perp}$ ,  $\zeta = 1 - z/l$ , l - товщина області розсіювання,  $V_{\perp} \equiv V_{\perp}(\zeta) = V \sin \varepsilon / (R(\zeta) / R_0)$ ,  $R_0 = 1$  а.о.,  $I_0$  і  $\theta$  – інтенсивність і кутовий розмір джерела з гаусовим розподілом інтенсивності радіовипромінювання,  $\kappa_{\perp} = |\vec{\kappa}_{\perp}|$ ,  $\vec{\kappa}_{\perp} = \{\kappa_x, \kappa_y\}$  - просторовий хвильовий вектор,  $\sigma_N^2(\zeta)$  - дисперсія відносних флуктуацій електронної концентрації  $\delta N^2 / \langle N \rangle^2$ ,  $L_0$ ,  $l_0$  - зовнішній і внутрішній масштаби турбулентності, n – показник ступеня просторового спектру неоднорідностей електронної концентрації.

Крос-спектр мерехтінь при спостереженнях в двох рознесених в просторі точках описується виразом:

$$W(r,f) \approx 2\pi^{2} I_{0}^{2} \frac{l\omega_{p}^{4}}{(c\omega)^{2}} \int_{0}^{1} d\zeta \int_{a}^{\infty} \kappa_{\perp} d\kappa_{\perp} \left[1 - \cos\left(\kappa_{\perp}^{2} l\zeta c / \omega\right)\right] \times \\ \times \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\kappa_{\perp} l\zeta \theta\right)^{2} + i \frac{2\pi fr}{V_{\perp}(\zeta)}\right] \frac{\Phi_{N}(\kappa_{\perp},0,\zeta)}{\left[\zeta \left(\kappa_{\perp}^{2} V_{\perp}^{2} - 4\pi^{2} f^{2}\right)\right]^{1/2}}$$
(4.2)

Тут *г* – відстань між приймальними антенами (база інтерферометра).

Оцінивши крос-спектр (4.2) можливо отримати дисперсійну залежність фазової швидкості мерехтінь:

$$V(f) = \frac{2\pi fr}{\Delta\varphi(f)} \quad , \tag{4.3}$$

<sub>de</sub> 
$$\Delta \varphi(f) = arctg \frac{\mathrm{Im}W(r, f)}{\mathrm{Re}W(r, f)}$$
.

Приведені вище формули більш адекватно описують явище міжпланетного мерехтіння декаметрового радіовипромінювання, ніж вирази, які можна отримати на основі методу фазового екрану, що зазвичай застосовується при інтерпретації
високочастотних даних. Адекватність, серед іншого, проявляється в кращому збігу параметрів сонячного вітру, отриманих по формулам (4.1-4.3), та виміряних космічними апаратами.

В методиці параметри сонячного вітру визначаються шляхом суміщення теоретичних (4.1, 4.3) і експериментальних залежностей. Для розрахунків теоретичних залежностей нарівні з простою моделлю сферично симетричного сонячного вітру з середньою швидкістю V, показником трьохмірного спектру флуктуацій густини електронів n та дисперсією флуктуацій густини електронів, яка зменшується з відстанню від Сонця як  $\sigma_N(\zeta) \propto (R(\zeta))^{-b}, b \approx 2$ , використовується більш складна багатопотокова модель. В цьому випадку вважається, що промінь зору послідовно перетинає кілька потоків сонячного вітру. Наприклад, у трьохпотоковій моделі промінь зору перетинає послідовно три потоки з шириною  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_3$  з параметрами відповідно  $V_1, n_1, b_1, \sigma_{N1}(\zeta), V_2, n_2, b_2, \sigma_{N2}(\zeta)$  і  $V_3, n_3, b_3, \sigma_{N3}(\zeta)$ . Зазвичай припускається, що  $\sigma_{N1}(R_0)V_1 \approx \sigma_{N2}(R_0)V_2$ ,  $\sigma_{N2}(R_0)V_2 \approx \sigma_{N3}(R_0)V_3$ , що не суперечить відомим із спостережень параметрам повільного і швидкого сонячного вітру і дозволяє спрощувати задачу. Енергетичний спектр слабких мерехтінь у цьому випадку можливо представити у вигляді суми  $W_{\Sigma}(f) = \sum_{i=1}^{3} W_m(f, v_m, n_m, b_m)$ , де  $W(f, v_1, n_1, b_1)$ ,  $W(f, v_2, n_2, b_2)$ і  $W(f, v_3, n_3, b_3)$  визначаються із виразу (4.1). Присутність на промені зору потоків, які суттєво відрізняються по потужності ( $\sigma_{Ni}(R_0)V_i \neq \sigma_{Ni}(R_0)V_i$ , де i, j = 1, 2, 3), призводить до незначного викривлення параметрів потоку з більшою потужністю. В цьому випадку

На рис. 4.1 наведено приклад вписування теоретичного спектру (а) та дисперсійної залежності фазової швидкості міжпланетних мерехтінь (б) в експериментальні дані. На рис. 4.2 показано реконструкцію потокової структури сонячного вітру за результатами процедури "model fitting", показаної на рис. 4.1. Видно, що в даному випадку на промені зору на радіо джерело (квазар 3С196) присутні три потоки сонячного вітру з різними параметрами (перший потік:  $V_I$ =450 км/с,  $n_I$ =3.9,  $l_1$  =0.4 а. о., другий потік:  $V_2$ =560 км/с,  $n_2$ =3.8,  $l_2$  = 0.6 а. о., третій потік :  $V_3$ =290 км/с,  $n_3$ =3.8).

можливе застосування одношвидкісної моделі.



Рис. 4.1. Приклад вписування теоретичного спектру (а, суцільна лінія) та теоретичної дисперсійної залежності фазової швидкості мерехтінь (б, суцільна лінія) в експериментальні дані (точки).



Рис. 4.2. Приклад встановлення потокової структури сонячного вітру в напрямку на радіоджерело 3С144.

Наявність достатнього об'єму даних параметрів потоків сонячного вітру дозволяє провести їх статистичний аналіз. На рис. 4.3 по показано гістограми швидкості (а) та показника трьохвимірного просторового спектра флуктуацій (б) для повільних потоків сонячного вітру. Гістограми на рис. 4.4 ілюструють ті ж характеристики для швидких потоків сонячного вітру. Показані гістограми дозволяють визначити найбільш ймовірні значення цих параметрів:  $V = 350 \pm 20$  км/с,  $n = 3.7 \pm 0.05$  для повільних та  $V = 590 \pm 30$  км/с,  $n = 3.5 \pm 0.1$  для швидких потоків, відповідно.



Рис. 4.4. Швидкість (а) та показник трьохвимірного просторового спектра флуктуацій (б) для повільних потоків сонячного вітру.



Рис. 4.5. Швидкість (а) та показник трьохвимірного просторового спектра флуктуацій (б) для швидких потоків сонячного вітру.

### 4.2. Комплексні дослідження геоефективних проявів сонячної активності

Роглянемо результати комплексних досліджень геоефективних проявів сонячної активності на прикладі події 22 травня 2013 р. за експериментальними даними синхронного моніторингу декаметрової компоненти спорадичного радіовипромінювання Сонця, природного атмосферного інфразвуку та атмосферного електричного поля, а також

доступними геомагнітними даними і даними про сонячну активність в інших діапазонах (WDC for Geomagnetism, SOHO LASCO, NOAA GOES).

На рис. 4.6 представлені графіки, що характеризують стан активності Сонця за період 22.05 – 24.05.2013 р. На верхньому графіку представлено переміщення (в радіусах Сонця) корональних викидів мас (КВМ) від часу. 22.05.2013 р. в 12:47:06 UT за даними SOHO LASCO зареєстровано початок КВМ типу гало, що рухався із швидкістю 1466 км/с.

На середньому графіку рис.4.6 представлено часову залежність рентгенівського випромінювання. Активна область 1745 локалізована в північно-західній частині сонячного диска, з геліографічними координатами (N15 W70) 22.05.2013 р. стала джерелом сонячного спалаху в рентгенівському діапазоні класу M5.0, який розпочався в 13:08:00 UT і тривав 60 хв за даними NOAA GOES. Максимум спалаху припав на 13:32:00 UT.

На нижньому графіку рис. 4.6 представлено часову залежність густини потоку високо-енергійних частинок. За даними NOAA GOES зростання потоку високо-енергійних частинок (>10 MeV) почалося 22.05.2013 р. о 14:20 UT, максимум потоку припав на 06:50 UT 23.05.2013 р. і досягнув величини 1660 см $^2$ с $^{-1}$ ср $^{-1}$ .



Рис. 4.6. Стан активності Сонця 22.05 2013 р.

На рис. 4.7 представлена часова залежність декаметрового спорадичного радіовипромінювання Сонця зареєстрована 22.05.2013 р.



Рис. 4.7. Часова залежність декаметрового спорадичного радіовипромінювання Сонця

На рис. 4.8 представлена годинна реалізація спектрограми і часового профілю на частоті 26 МГц спорадичного радіовипромінювання Сонця в цей день.



Рис. 4.8. Спектрограма (а) і часовий профіль на частоті 26 МГц (б) спорадичного радіовипромінювання Сонця 22.05 2013 р.

В 13:00 UT радіотелескопом УРАН-З зареєстровано початок зростання величини (на три порядки) на частоті 26 МГц спорадичного декаметрового радіовипромінювання Сонця викликаного КВМ і спалахом на Сонці (рис 4.7, 4.8). На спектрограмі радіовипромінювання Сонця (рис. 4.8) через 13 хв від моменту виникнення КВМ зареєстровано початок радіосплеску II типу (13:00 UT) на частоті 26 МГц із дрейфом до нижніх частот. Швидкість дрейфу сплеска II типу склала 35 кГц/с.

На рис. 4.9 представлено геофізичні прояви сонячної активності, що мали місце 22 травня 2013 р.



Рис. 4.9. Збурення геофізичних полів викликані КВМ і сонячним спалахом 22.05 2013 р., які супроводжувалися сплесками II і IV типів декаметрового радіовипромінювання Сонця

Зокрема, на верхньому графіку рисунка представлено часову залежність Dstіндекса геомагнітної активності за даними WDC for Geomagnetism, Kyoto. Через ~ 45 год від початку сонячного спалаху і КВМ, зареєстровано початок магнітної бурі. Магнітна буря розпочалася 24.05.2013 р. о 10:00 UT. Зменшення індекса Dst досягло величини -55 нТ, тривалість головної фази магнітної бурі становила 22 год, а фази відновлення – 5 днів

На середньому і нижньому графіках рисунка представлено відповідно експериментально зареєстровані часові залежності атмосферного електричного і атмосферного інфразвукового полів.

Збурення атмосферних електричного і інфразвукового полів спостерігаються вже через десятки хвилин після сонячного спалаху, що може бути викликано приходом в атмосферу Землі високо-енергійних частинок.

Після досягнення Землі КВМ на записах атмосферного електричного і атмосферного інфразвукового полів спостерігаються значні (в рази) й тривалі (~ 30 год. для атмосферного електричного поля і ~ 40 год. для атмосферного інфразвуку) збурення викликані сонячною активністю.

## 4.3. Висновки до розділу

Створено методику встановлення потокової структури сонячного вітру за орбітою Землі. Методика основана на аналізі часових, частотних та просторових характеристик міжпланетних мерехтінь декаметрового радіовипромінювання космічних радіоджерел. Виявлення потокової структури відкриває унікальні можливості для досліджень фізики міжпланетної плазми. Зокрема, різниця в параметрах потоків міжпланетної плазми може бути використана для досліджень високошвидкісних потоків сонячного вітру з корональних дір, виявлення і вивчення динаміки руху корональних викидів маси в міжпланетному просторі. Останнє, наприклад, дозволить розробити надійну методику оцінки часу приходу корональних викидів маси до Землі, що представляє безумовний інтерес, з точки зору прогнозу космічної погоди.

На основі досліджень сонячно-земних зв'язків за експериментальними даними синхронного моніторингу декаметрової компоненти спорадичного радіовипромінювання Сонця, атмосферного інфразвуку та електричного поля за період 2011-2016 рр., а також доступними геомагнітними даними і даними про сонячну активність в інших діапазонах (WDC for Geomagnetism, SOHO, SDO, GOES) запропоновано ширше трактування терміну "reoeфektrubnictь сонячної активності", що базується на врахуванні збурення не тільки геомагнітного поля, а й інших геофізичних полів: атмосферного інфразвуку, атмосферного електричного поля.

# Література до розділу

4.1. Ольяк М.Р., Калиниченко Н.Н., Коноваленко А.А., Браженко А.И., Бубнов И.Н. Спектр турбулентности межпланетной плазмы на расстояниях от Солнца, больших 1 а.е. // Радиофизика и радиоастрономия, 2016, т. 21, N4, с. – 249 - 258.

#### ВИСНОВКИ

Роботи, що проведені в рамках "Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2012 - 2016" по проектам під загальною назвою "Скоординовані синхронні дослідження об'єктів сонячної системи методами наземно-космічної низькочастотної радіоастрономії" дозволили отримати ряд нових наукових результатів в області вивчення об'єктів Сонячної системи. В даному звіті детально описані результати за 2016 рік, а головні досягнення попередніх етапів в рамках п'ятирічної теми описані в передмовах до розділів і в кожному розділі – від отримання результатів спостережень до публікацій.

Дослідження охоплювали широкий спектр об'єктів Сонячної системи і явищ різноманітної фізичної природи і енергетики – від електростатичних розрядів в атмосфері Сатурна до потужних викидів корональних мас Сонця. Ключовою відмінністю всього охопленого кругу задач було використання багатоантенних спостережень. Це вкрай важливо особливо в декаметровому діапазоні довжин хвиль, де радіозавади і мерехтіння на міжпланетній плазмі і в іоносфері Землі спотворюють спектр і інтенсивність сигналів космічних джерел. Використання різних наземних радіотелескопів і космічних апаратів дозволяють відокремити одне від одного сигнали завад, вплив мерехтінь і досліджуване випромінювання з найвищим із досягнутих на даний момент рівнем надійності. Це дозволяє зробити наступні кроки в напрямку пошуку нових астрономічних ефектів, їх фізичної інтерпретації та побудови більш достовірних моделей космічних об'єктів.

Основні результати по чотирьом напрямкам: (а) дослідження випромінювання Юпітера на радіотелескопах УТР-2, УРАН, ГУРТ синхронно з місією Juno, (б) геліографічні та спектральні дослідження стаціонарних сплесків IV типу, (в) дослідження радіовипромінювання блискавок в атмосфері Сатурна і (г) комплексні дослідження сонячного вітру та геоефективних проявів сонячної активності наведені нижче.

1. Багатоантенні спостереження радіовипромінювання Юпітера дозволили виділити нові риси і, навіть, типи випромінювання. Особливу цінність мають отримані спостережні дані, записані синхронно з КА Джуно і багатьма різноманітними телескопами світу. Для обміну даними розроблені програми формування метаданих файлів спостережень. Багатоантенні вимірювання з прив'язкою до абсолютного часу дозволяють проводити різноманітні типи обробки. Одним з них є використання кількох антен в режимі інтерферометрів з короткими і довгими базами. Для коректного впровадження цих режимів зроблені оцінки міри розсіювання в міжпланетній плазмі. Верхня межа цього параметра в декаметровому діапазоні (0.01 мкс) дозволяє досліджувати найкоротші деталі радіовипромінювання джерел Сонячної системи, наприклад, S-сплесків системи Юпітер – супутники і блискавок в атмосфері Сатурна. Розроблено алгоритм оцінки відносних флуктуацій коефіцієнта заломлення поблизу джерел радіовипромінювання Сонячної системи таких, як Юпітер, Сатурн, Сонце. Для виключення спотворень, що вносяться іоносферою Землі, даний алгоритм також передбачає спільне використання інтерферометрів з короткими і довгими базами.

2. На основі одночасних спостережень радіотелескопів/геліографів УТР-2 (8-33 МГц), NDA (33.0-80.0 МГц), e-Callisto (100-144 МГц) і ORFEES (144-450 МГц) було побудовано зображення і рух КВМ і проведено спектральний аналіз сплесків радіовипромінювання IVs типу. Все це дозволило вивчити багато аспектів події 6 вересня 2014 року, в особливості просторові характеристики і динамічну еволюцію радіоджерел сплесків IVs типу.

В результаті цієї роботи встановлено, що сплески IVs типу мають дві компоненти, високих і низьких тонів. НЧ декаметровий континуум IVs типу мав двогорбу форму профілів радіоінтенсівності, яка корелювала з часом з появою двох слабких сонячних спалахів з активної області, пов'язаної з КВМ. При цьому було встановлено, що початковий і кінцевий час високих і низьких тонів сплесків IVs типу дуже близькі один до одного. Крім того, згідно з виміряним зображень NRH і УТР-2 радіоджерела обох компонентів показують просторово корельований рух разом з розвитком КВМ.

На підставі цих спостережень, ми можемо припустити, що ВЧ і НЧ джерела з'єднані високолежачою структурою типу магнітної петлі, одне з основань якої розташовується в активній області, таким чином, дозволяючи енергійним інжектованим в петлю електронам прискорюватися під час спалахів і утримуватися в пастці. Ми вважаємо, що динамічний рух радіоджерел є відгуком петлі на збурення, що викликані КВМ.

Це дослідження демонструє великий потенціал у використанні нещодавно модернізованого геліографу на основі решітки УТР-2, що дозволило вперше виявити просторову еволюцію радіосплесків IV типу в декаметровому діапазоні довжин хвиль.

3. Завдяки високій ефективній площі радіотелескопа УТР-2 і, як наслідок, можливості встановлювати високу часову роздільну здатність в цифрових приймачах, були вперше зареєстровані субмиілісекундна і мікросекундна структури в записах блискавок в атмосфері Сатурна. Запис даних з різною часовою роздільною здатністю дозволив виділити і велику кількість слабких розрядів, і достатню кількість потужних короткотривалих (долі мілісекунд) сплесків, які дозволяють проаналізувати дисперсійну затримку в міжпланетному середовищі. Було повністю проаналізовано дані сесії спостережень гігантського шторму на Сатурні 21-27 грудня 2010 р. Розроблені методи аналізу, програми і отримані результати будуть мати дуже велику цінність для порівняння з майбутніми гігантськими штормами (так званими "Великими Білими Плямами", які спостерігаються з регулярністю біля 30 років) вже після завершення місії Кассіні. Дані спостережень внесені до каталогу.

4. Створено методику встановлення потокової структури сонячного вітру за орбітою Землі. Методика основана на аналізі часових, частотних та просторових характеристик міжпланетних мерехтінь декаметрового радіовипромінювання космічних радіоджерел. Виявлення потокової структури відкриває унікальні можливості для досліджень фізики міжпланетної плазми. Зокрема, різниця в параметрах потоків міжпланетної плазми може бути використана для досліджень високошвидкісних потоків сонячного вітру з корональних дір, виявлення і вивчення динаміки руху корональних викидів маси в міжпланетному просторі. Останнє, наприклад, дозволить розробити надійну методику оцінки часу приходу КВМ до Землі, що представляє безумовний інтерес, з точки зору прогнозу космічної погоди.

На основі досліджень сонячно-земних зв'язків за експериментальними даними синхронного моніторингу декаметрової компоненти спорадичного радіовипромінювання Сонця, атмосферного інфразвуку та електричного поля за період 2011-2016 рр., а також доступними геомагнітними даними і даними про сонячну активність в інших діапазонах (WDC for Geomagnetism, SOHO, SDO, GOES) запропоновано ширше трактування терміну "геоефективність сонячної активності", що базується на врахуванні збурення не тільки геомагнітного поля, а й інших геофізичних полів: атмосферного інфразвуку, атмосферного електричного поля.

Таким чином, цілі і завдання проекту виконані повністю. Отримані результати, кількість і якість наукових публікацій, нові дані спостережень безперечно показують, що продовження фінансування даної роботи себе повністю виправдовує.

# ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ НДР за 2016 р.

#### Статті в реферованих журналах

1. Konovalenko A., Sodin L., Zakharenko V., Zarka P., Ulyanov O., Sidorchuk M. et al., "The modern radio astronomy network in Ukraine: UTR-2, URAN and GURT", 2016, Experimental Astronomy, Vol. 42, Is. 1, pp. 11–48.

Koval A.A., Stanislavsky A.A., Chen Y., Feng S., Konovalenko A.A., Volvach Ya.S.,
"A Decameter Stationary Type IV Burst in Imaging Observations on the 6th of September
2014", 2016, AJ, Vol. 826, A125, pp.1-11.

3. Коноваленко А.А., Ерин С.Н., Бубнов И.Н., и.др., "Астрономические исследования с помощью малоразмерных низкочастотных радиотелескопов нового поколения", 2016, Радиофизика и радиоастрономия, Т. 21, № 2, с. 83-131.

4. Litvinenko GV, Shaposhnikov VE, Konovalenko AA, Zakharenko VV, Panchenko M, Dorovsky VV, et al. Quasi-similar decameter emission features appearing in the solar and jovian dynamic spectra, 2016, Icarus, Vol. 272, pp. 80–87.

5. Коноваленко О., Зарка Ф., Захаренко В., Ульянов О., и.др., "Сучасний стан низькочастотної радіоастрономії в Україні: наземні та наземно-космічні дослідження", Космічні дослідження в Україні. 2014-2016, Наук. ред.: О.П. Федоров; ІКД НАНУ та ДКАУ, Київ: Академперіодика, 2016, с.64-70.

6. Ольяк М.Р., Калиниченко Н.Н., Коноваленко А.А., Браженко А.И., Бубнов И.Н. Спектр турбулентности межпланетной плазмы на расстояниях от Солнца, больших 1 а.е. // Радиофизика и радиоастрономия, 2016, т. 21, N4, с. – 249 - 258.

## Міжнародні конференції

1. Konovalenko A., Zarka P., Rucker H., Zakharenko V., Ulyanov O., Litvinenko G.6 et al., "Multi-antenna observations in the low-frequency radio astrobnomy for the Solar System objects and related topic studies". 8th International Workshop on Planetary, Solar and Heliospheric Radio Emissions, Seggauberg near Graz, Austria, October 25-27, 2016.

2. Koval A., Chen Y., Stanislavsky A., Konovalenko A., Volvach Ya., "Radio images of meter-decameter solar stationary type IV burst", 13th Annual Meeting AOGS (Asia Oceania Geoscience Society), Beijing, China 31 July – 5 August, 2016.

3. Mylostna K., Zakharenko V., Fischer G., "Study of SED's emission parameters". 8th International Workshop on Planetary, Solar and Heliospheric Radio Emissions, Seggauberg near Graz, Austria, October 25-27, 2016. 4. Litvinenko G., Konovalenko A., Zakharenko V., Ulyanov O., et al., "Analysis of the observational characteristics of shadow-effects of the Jovian DAM emission". 8th International Workshop on Planetary, Solar and Heliospheric Radio Emissions, Seggauberg near Graz, Austria, October 25-27, 2016.

5. Stanislavsky A., Koval A., Abranin E., Konovalenko A., Volvach Ya., "Progress in the heliographic study using the UTR-2 radio telescope at decameter wavelengths", Solar and Heliospheric Radio Emissions, Seggauberg near Graz, Austria, October 25-27, 2016.

6. Kalinichenko N.N., Olyak M.R., Konovalenko A.A., Fallows R., Zarka P., Rucker H.O., Lecacheux A., Bubnov I.N., Yerin S.N., Brazhenko A.I., Ivantishin O.L., Koshovy V.V., Lytvynenko O.A. The investigations of the solar wind beyond Earth's orbit by IPS observations at decameter wavelengths: present state and perspectives. // Abstract book of the 8-th International Workshop on "Planetary, Solar and Heliospheric Radio Emissions" (PRE VIII) held at Leibnitz, Austria, October 25 - 27, 2016, p 59.

7. Kalinichenko N.N., Konovalenko A.A., Brazhenko A.I., Ivantishin O.L., Lytvynenko O.A., Olyak M.R., Bubnov I.N., Yerin S.N. The investigations of the interplanetary scintillations at decameter wavelengths: the present state and perspectives // Abstract book of the 7th Workshop "Solar influence on the magnetosphere, ionosphere and atmosphere" held at Sunny beach, Bulgaria, 30 May – 3 June, 2016, p. 12.

8. Калініченко М.М., Ольяк М.Р., Коноваленко О.О., Браженко А.І., Івантишин О.Л., Литвиненко О.О., Бубнов І.М., Єрін С.М. Сонячний вітер за даними спостережень міжпланетного мерехтіння космічних радіоджерел у декаметровому діапазоні радіохвиль // Збірник трудів конференції « Проблеми сучасної астрономії та методики її викладання", Глухів, Україна, 6 - 8 жовтня 2016, с.118.

9. Imai M., Lecacheux A., Clarke T.E., Higgins C.A., Panchenko M., Kurth W.S., Brazhenko A.I., Frantsuzenko A.V., Zakharenko V.V., Konovalenko A.A., Koshovyy V.V., and Ivantyshin O.N. Jupiter's Decametric Radio Common Observation Campaign from the LWA1, NDA, and Ukrainian Radio Telescopes from January to August 2016 // Science at Low Frequencies III at Caltech from Dec. 7-9, 2016 (http://www.tauceti.caltech.edu/science-at-lowfrequencies-2016/)

# ПУБЛІКАЦІЇ ПО НДР "САНСІ" ЗА 2014-2015 р.р.

## Статті в реферованих журналах

 Милостная К.Ю., Захаренко В.В., Коноваленко А.А., Фишер Г., Зарка Ф., Сидорчук М.А. Тонкая временная структура молний на Сатурне // Радиофизика и радиоастрономия, 2014, Т. 19, № 1, С. 10-19. 2. Ryabov V.B., Zarka P., Hess S., Konovalenko A., Litvinenko G., Zakharenko V., Shevchenko V.A., and Cecconi B. Fast and slow frequency-drifting millisecond bursts in Jovian decametric radio emissions // A&A, 2014, 568, A53, DOI: 10.1051/0004-6361/201423927.

3. Stanislavsky A.A., Bubnov I.N., Konovalenko A.A., Gridin A.A., Shevchenko V.V., Stanislavsky L.A., Mukha D.V., Koval A.A. First radio astronomy examination of the lowfrequency broad-band active antenna subarray, // Advances in Astronomy, 2014, V. 2014, Article ID 517058, P. 1-5.

4. Morosan D.E., Gallagher P.T., Zucca P., Fallows R., Carley E.P., Mann G., Bisi M.M., Kerdraon A., Konovalenko A.A. et al. LOFAR tied-array imaging of Type III solar radio // A&A, 2014, V. 568, A67.

 Эволюция спектра радиоизлучения остатка вспышки сверхновой Кассиопея А на частотах 35–65 МГц, И.Н. Бубнов, А.А. Коноваленко, А.А. Станиславский, В.П. Бовкун, И.Н. Жук, Д.В. Муха // Радиофизика и радиоастрономия. – 2014. – Т. 19, № 2. – С. 111-119.

6. Васильева Я.Ю., Захаренко В.В., Коноваленко А.А., Зарка Ф., Ульянов О.М., Шевцова А.И., Скорик А.А., Декаметровый обзор северного неба с целью поиска пульсаров и источников транзиентного излучения. Первые результаты // Радиофизика и радиоастрономия, 2014, Т. 19, № 3, С. 197-205.

7. Stanislavsky A.A., Konovalenko A.A., Koval A.A., Dorovskyy V.V., Zarka Ph., Rucker H.O., Coronal magnetic field strength from decameter zebra-pattern observations: complementarity with band-splitting measurements of associated type II burst // Solar Physics, 2015, V. 290, Is. 1, P. 205-218.

8. Morosan D.E., Gallagher P.T., Zucca P., O'Flannagain A., Fallows R., Reid H., Magdalenic J., Mann G., Bisi M.M., Kerdraon A., Konovalenko A.A., et al., LOFAR tied-array imaging and spectroscopy of solar S bursts // A&A, 2015, V. 580, A65.

9. Dorovskyy V.V., Melnik V.N., Konovalenko A.A., Brazhenko A.I., Panchenko M., Poedts S., Mykhaylov V.A., Fine and superfine structure of Decameter-Hectometer type II burst on 2011 June 7 // Solar Physics, 2015, V. 290, Is. 7, pp 2031-2042.

10. Ольяк М. Р. Быстрый солнечный ветер и геомагнитная активность // Радиофизика и радиоастрономия. – 2015. – Т. 20, №1, С. 3 – 9.

## Міжнародні конференції

1. Zarka P., Fischer G., Farrell W. et al., Earth-Based observations of SED, Cassini-RPWS meeting, Iowa-City, May 19-23, 2014. 2. Zakharenko V., Konovalenko A., Litvinenko G. et al., Solar system radio emissions studies with the largest low-frequency radio telescopes // European Planetary Science Congress 2014, 7 – 12 September, Cascais, Portugal, Abstracts, Vol. 9, EPSC2014-114, 2014.

3. Stanislavsky A.A., Konovalenko A.A., Koval A.A., Dorovsky V.V. What can be interesting in the analysis of crowded solar bursts for the study of solar activity? // Sixth Workshop "Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere", 26-30 May 2014, Sunny Beach, Bulgaria.

4. Koval A.A., Stanislavsky A.A., Konovalenko A.A. Angular study of the III type solar bursts by Ukrainian decameter heliograph of UTR-2 // European Geosciences Union General Assembly 2014, EGU2014-655, 27 April–02 May, 2014, Vienna, Austria.

5. Koval A.A., Stanislavsky A.A., Konovalenko A.A., Tracking of radio burst sources in solar corona by heliographic means, 14-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School, 17-24 August, 2014, Odessa, Ukraine.