

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ГОЛОВНА АСТРОНОМІЧНА ОБСЕРВАТОРІЯ

Васильківський Євген Володимирович

УДК 520 + 524.5 + 524.6

**ВЕЛИКОМАСШТАБНИЙ РОЗПОДІЛ ІОНІЗОВАНОГО ВУГЛЕЦЮ
В ГАЛАКТИЦІ**

01.03.02 – Астрофізика, радіоастрономія

10 – Природничі науки, 104 – Фізика та астрономія

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата фізико-математичних наук

Київ – 2023

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Робота виконана у Радіоастрономічному інституті Національної академії наук України.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук,
академік НАН України
Коноваленко Олександр Олександрович,
Радіоастрономічний інститут НАН України,
заступник директора з наукової роботи.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор,
член-кореспондент НАН України
Новосядлий Богдан Степанович,
Астрономічна обсерваторія Львівського національного
університету імені Івана Франка МОН України,
головний науковий співробітник.

кандидат фізико-математичних наук, доцент
Решетник Володимир Миколайович,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка
МОН України, доцент кафедри астрономії та фізики
космосу.

Захист відбудеться 19 грудня 2023 р. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.208.01 при Головній астрономічній обсерваторії НАН України за адресою: 03143, м. Київ, вул. Академіка Заболотного, 27, ГАО НАН України.

Початок засідання о 10 годині.

Із дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Головної астрономічної обсерваторії НАН України за адресою: 03143, м. Київ, вул. Академіка Заболотного, 27, ГАО НАН України.

Автореферат розіслано 15 листопада 2023 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.208.01
кандидат фізико-математичних наук

І. В. Кулик

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Міжзоряне середовище (МЗС) є нерівноважною, багатокомпонентною системою з безперервним обміном масою, енергією та імпульсом. Основною складовою МЗС є його газовий компонент, що представлений широкими діапазонами фізичних умов. Дослідження газового компонента вкрай важливі для розуміння фізичних, хімічних, кінематичних властивостей міжзоряних хмар, які в свою чергу складають майже 95% об'єму МЗС. Одними з найефективніших методів дослідження міжзоряного газу в різних формах є спектроскопічні методи. Особливий інтерес викликає спектроскопія за допомогою радіоліній різних типів. Це обумовлюється тим, що у радіодіапазоні, на відміну від оптичного, тісніша взаємодія речовини з випромінюванням, ширший частотний діапазон, відсутність впливу на радіохвилі частинок пилу, можливість реалізації більш високої спектральної роздільної здатності. Суттєвим внеском у сучасну астрофізику була реєстрація більше 45 років тому вкрай низькочастотних спектральних ліній у радіодіапазоні на українському радіотелескопі УТР-2 – рекомбінаційних радіоліній (РРЛ) вуглецю від холодних ділянок газу в МЗС. Ці лінії зарекомендували себе унікальним та найбільш точним засобом діагностики фізичних умов у холодному, розрідженому газі в МЗС. Основні спостережувані характеристики РРЛ (відносна інтенсивність та ширина лінії) можуть бути використані для визначення основних фізичних параметрів МЗС – електронної температури, електронної густини, міри емісії, а також для оцінки механізмів іонізації, рекомбінації та вивчення властивостей високозбуджених рідберговських атомів, що не можна зробити у земних лабораторних умовах.

Упродовж років після їх першої реєстрації, низькочастотні РРЛ вуглецю були широко досліджені як на радіотелескопі УТР-2, так і на інших радіотелескопах. Були отримані значення фізичних умов у холодному, низькощільному розподіленому газі, що відповідають електронним температурам близько 50 – 100 К, електронним густинам $\leq 0.1 \text{ см}^{-3}$. Враховуючи результати вимірювань на багатьох частотах, було запропоновано модель фізичних умов областей, де формуються низькочастотні РРЛ вуглецю; в рамках цієї моделі іонізований вуглець у Галактиці просторово асоційований із хмарами нейтрального гідрогену H I, які широкорозповсюджені як у межах галактичної площини, так і на великих висотах над площиною (до 500 пк). Здебільшого в низькочастотних РРЛ вивчались ділянки газу в межах площини та при невеликих відхиленнях від неї. Дослідження цих ліній від ділянок МЗС, що лежать на високих галактичних широтах, до цього часу не проводилися. Причинами цього були вкрай низькі очікувані інтенсивності ліній (порядку 10^{-5} – 10^{-6} від рівня фону) та недостатня чутливість радіотелескопів і цифрових засобів реєстрації. Після впровадження на радіотелескопі УТР-2 багатоканальних, багатобітових цифрових спектроаналізаторів DSP-Z з великим динамічним діапазоном з'явилась можливість реалізації високочутливої низькочастотної радіоспектроскопії МЗС. Це дає можливість провести дослідження низькочастотних РРЛ вуглецю з вкрай високою чутливістю для вивчення

великомасштабного розподілу іонізованого газу в Галактиці – як у межах площини, так і на високих галактичних широтах.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота була виконана у відділі декаметрової радіоастрономії Радіоастрономічного інституту НАН України та є складовою частиною наступних проєктів:

- «Створення та використання елементів сучасних радіоастрономічних засобів України УТР-2, УРАН, ГУРТ у вітчизняних і міжнародних астрофізичних дослідженнях» (шифр: РАДІОТЕЛЕСКОП-16, № держ. реєстрації 0116U002877), 2016 р. (здобувач – відповідальний виконавець);
- «Створення та використання елементів сучасних радіоастрономічних засобів України УТР-2, УРАН, ГУРТ у вітчизняних і міжнародних астрофізичних дослідженнях» (шифр: РАДІОТЕЛЕСКОП-17, № держ. реєстрації 0117U002394), 2017 р. (здобувач – відповідальний виконавець);
- «Інструментальне та інформаційне приєднання радіотелескопів УТР-2, УРАН, ГУРТ до світових мереж низькочастотної радіоастрономії» (шифр: РАДІОТЕЛЕСКОП, № держ. реєстрації 0118U000561), 2018 – 2022 рр. (здобувач – відповідальний виконавець);
- «Радіовипромінювання Всесвіту у декаметровому діапазоні хвиль» (шифр: КОФР-3, № держ. реєстрації 0117U000246), 2017 – 2021 рр. (здобувач – відповідальний виконавець);
- «Дослідження структури космічних радіоджерел в широкій смузі частот за допомогою мережі декаметрових інтерферометрів УРАН» (шифр: МЕРЕЖА-5, № держ. реєстрації 0118U003073), 2018 – 2022 рр. (здобувач – відповідальний виконавець);
- «Нові горизонти вітчизняної та міжнародної низькочастотної радіоастрономії» (шифр: ГОРИЗОНТ, № держ. реєстрації 0120U100234), 2020 – 2021 рр. (здобувач – відповідальний виконавець);
- «Дослідження Галактики за допомогою рекомбінаційних радіоліній вуглецю в декаметровому та метровому діапазонах довжин хвиль» (шифр: ЗЕНИТ, № держ. реєстрації 0121U111809), 2021 – 2022 рр. (здобувач – керівник);
- «Детектування та діагностика міжзоряних плазмових утворень, що поглинають та трансформують нетеплове низькочастотне космічне радіовипромінювання» (шифр: МІЖЗІР'Я, № держ. реєстрації 0122U002581), 2022 р. (здобувач – відповідальний виконавець);
- «Діагностичне зондування міжзоряного середовища за допомогою низькочастотного космічного радіовипромінювання» (шифр: МІЖЗІР'Я-2, № держ. реєстрації 0123U102426), 2023 р. (здобувач – відповідальний виконавець).

Мета та завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є вивчення розподілу іонізованого вуглецю в Галактиці за даними спостережень низькочастотних РРЛ вуглецю у різних ділянках Галактики. Для досягнення поставленої мети були сформульовані наступні задачі:

1. Розробити методологію проведення всеохоплюючих високочутливих радіоспектроскопічних спостережень на радіотелескопі УТР-2.

2. Провести оглядові спостереження низькочастотних РРЛ вуглецю на радіотелескопі УТР-2 із цифровими спектроаналізаторами DSP-Z у якості реєстраторів.
3. Розробити методики зчитування спектроскопічних даних з файлів формату спектроаналізатора DSP-Z, визначення точних координат ділянок, відстежуваних діаграмою направленості (ДН) радіотелескопа при огляді, та розробити багатоступеневі методики обробки отримуваних спостережних даних для усунення впливу радіозавад, розбивки та усереднення даних.
4. Отримати підсумкові спектри низькочастотних РРЛ вуглецю для різних ділянок небесної сфери, визначити спостережні характеристики зареєстрованих РРЛ.
5. Провести астрофізичний аналіз умов у середовищі, де ці лінії виникають, за отриманими характеристиками низькочастотних РРЛ вуглецю, зареєстрованих як в межах галактичної площини, так і за її межами.
6. З'ясувати великомасштабний просторовий розподіл іонізованого вуглецю в Галактиці.

Об'єктом дослідження є монохроматичне радіовипромінювання, що виникає у МЗС як на різних галактичних довготах у межах галактичної площини, так і вдалині від неї на високих галактичних широтах.

Предметом дослідження є спостережні характеристики низькочастотних РРЛ вуглецю – відносна інтенсивність, ширина та радіальна швидкість лінії.

Методи дослідження. Експериментальні радіоспектроскопічні дослідження були виконані на радіотелескопі УТР-2 за допомогою ширококутових, багатоканальних спектроаналізаторів DSP-Z. Спостереження у рамках визначення великомасштабного розподілу іонізованого вуглецю були виконані методом сканування небесної сфери нерухомою ДН радіотелескопа за рахунок добового обертання Землі. Обробка результатів спостережень була виконана з використанням загальноприйнятих методів спектральної та статистичної обробки даних.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Розроблено високочутливу методологію радіоспектроскопічних досліджень МЗС у низькочастотних РРЛ вуглецю на основі використання найбільшого у світі декаметрового радіотелескопа УТР-2 та багатоканальних цифрових спектроаналізаторів нового покоління DSP-Z.
2. Проведено довготривалі високочутливі оглядові спостереження за програмою пошуку та досліджень низькочастотних РРЛ вуглецю в різних ділянках Галактики.
3. Вперше зареєстровано РРЛ вуглецю на декаметрових хвилях у значній частині галактичного простору – у десятки разів більшому об'ємі, ніж досліджувалось раніше. Вдалося виявити лінії як поблизу галактичної площини ($|b| = 0^\circ - 5^\circ$), так і далеко за її межами ($|b| = 5^\circ - 30^\circ$). Відносна інтенсивність ліній поглинання має порядок $10^{-4} - 10^{-5}$ від рівня континууму, ширина ліній лежить у межах 4 – 7 кГц (50 – 100 км/с).

4. Знайдено високий ступінь кореляції параметрів зареєстрованих ліній вуглецю із лінією нейтрального гідрогену Н І з урахуванням різної кутової роздільної здатності при спостереженнях на частотах 20 – 30 та 1420 МГц.
5. Вперше показано, що реєстрація РРЛ вуглецю та висока кореляція їх параметрів із параметрами лінії Н І дає унікальну можливість однозначного з'ясування фізичних параметрів дифузних гідрогенних хмар. У цьому випадку до одного рівняння, що пов'язує параметри ліній з густиною, температурою та розміром хмари (три невідомих) додається ще два – інтенсивність РРЛ вуглецю та її ширина. Визначено, що температура подібних хмар (кінетична та електронна) лежить у межах 50 – 100 К, електронна густина складає $\leq 0.01 \text{ см}^{-3}$, об'ємна густина гідрогену $\leq 35 \text{ см}^{-3}$, розмір хмар уздовж променя зору 5 – 10 пк.
6. Доведено актуальність і можливість виконання повного огляду доступних областей Галактики у низькочастотних РРЛ вуглецю. Це відноситься як до великомасштабного огляду із кутовою роздільною здатністю $\sim 10^\circ$ (антени «Північ – Південь» і «Захід – Схід» радіотелескопа УТР-2 та радіоінтерферометрів системи УРАН), так і до вивчення тонкої структури розподілу областей формування ліній із роздільною здатністю $< 1^\circ$ (УТР-2 у кореляційному режимі, ГУРТ, LOFAR, NenuFAR).

Практичне значення отриманих результатів. За результатами дисертаційної роботи отримано докази наявності великих об'ємів іонізованого газу далеко за межами галактичної площини, з'ясовано великомасштабний розподіл іонізованого вуглецю в Галактиці. Результати дисертаційної роботи можуть бути використані при подальших дослідженнях фізичних, хімічних, кінематичних, еволюційних та енергетичних властивостей холодних протяжних областей у галактичному МЗС.

Достовірність та обґрунтованість результатів досліджень. Отримані результати узгоджуються із загальноприйнятою моделлю областей формування ліній, в рамках якої іонізований вуглець просторово асоціюється із хмарами нейтрального гідрогену Н І, де вуглець частково або повністю іонізований ультрафіолетовими фотонами з довжинами хвиль $91.2 \text{ нм} < \lambda < 110 \text{ нм}$.

Особистий внесок здобувача. У рамках виконання роботи автор розробив методологію оглядових радіоспектроскопічних спостережень на радіотелескопі УТР-2, підготував комплекс процедур обробки даних та відповідні алгоритми програмного забезпечення; підготував та провів радіоспектроскопічні спостереження на радіотелескопі УТР-2, виконав обробку отриманих результатів. Автором особисто було виконано астрофізичний аналіз фізичних умов в областях формування зареєстрованих низькочастотних РРЛ вуглецю, запропоновано моделі цих областей, де передбачається просторовий зв'язок іонізованого вуглецю в Галактиці з нейтральним гідрогеном Н І.

Результати дисертаційної роботи опубліковано в 7 статтях у фахових реферованих виданнях та апробовано на 17 вітчизняних та міжнародних наукових конференціях. У роботі [1] внесок здобувача полягає у написанні тексту статті, проведенні спостережень на радіотелескопі УТР-2, створенні програм обробки спектроскопічних даних, отриманих за допомогою спектроаналізаторів DSP-Z. У

роботі [2] внесок здобувача полягає у проведенні радіоспектроскопічних спостережень за допомогою цифрового автокорелометра та спектроаналізаторів DSP-Z, розробці методик високочутливих, завадостійких, широкосмугових радіоспектроскопічних спостережень. У роботі [3] внесок автора полягає в участі у проведенні спільних спостережень на УТР-2 з іншими радіотелескопами в рамках наземної підтримки космічних місій (WIND, Stereo, Cassini, Juno). У роботі [4] внесок здобувача полягає у написанні тексту статті, створенні методик завадостійких та високочутливих радіоспектроскопічних досліджень на радіотелескопі УТР-2. У роботі [5] внесок здобувача полягає у проведенні спостережень, результати яких висвітлені у роботі, обробці радіоспектроскопічних даних. У роботі [6] внесок автора полягає у проведенні радіоспектроскопічних спостережень на УТР-2 за допомогою як цифрового автокорелометра, так і широкосмугових спектроаналізаторів DSP-Z, розробці методик обробки отриманих даних, участі у написанні тексту статті. У роботі [7] внесок автора полягає у написанні тексту статті, обробці даних, виконанні астрофізичного аналізу отриманих результатів. У роботі [8] внесок автора полягає у проведенні спостережень на радіотелескопі УТР-2, створенні програм обробки спектроскопічних даних, отриманих на DSP-Z, обробці даних і в написанні тексту статті. У роботі [9] внесок автора полягає у проведенні спостережень на радіотелескопі УТР-2, створенні програм обробки спектроскопічних даних, отриманих на DSP-Z, розробці методології оглядових радіоспектроскопічних спостережень, обробці даних, аналізі результатів, написанні тексту статті.

Апробація результатів дисертації. Результати роботи доповідалися та обговорювалися на науково-кваліфікаційних семінарах у Радіоастрономічному інституті НАН України і в Кільському університеті імені Крістіана Альбрехта (Німеччина), а також на вітчизняних та міжнародних наукових конференціях:

- 16-та Гамовська міжнародна конференція-школа «Астрономія і не тільки: астрофізика, космологія, космомікрофізика, астрофізика частинок, радіоастрономія та астробіологія», Одеса, Україна, 14 – 20 серпня 2016 року;
- Міжнародна конференція НАО-195 «Актуальні питання наземної спостережної астрономії», Миколаїв, Україна, 26 – 29 вересня 2016 року;
- Другий міжнародний форум молодих вчених з питань прикладної фізики та інженерії YSF-2016, Харків, Україна, 10 – 14 жовтня 2016 року;
- 8-й Міжнародний симпозіум з питань планетного, сонячного та геліосферного радіовипромінювання, Зеггауберг, Австрія, 25 – 27 жовтня 2016 року;
- 32-га Асамблея та науковий симпозіум Міжнародного радіосоюзу, Монреаль, Канада, 19 – 26 серпня 2017 року;
- 25-та Міжнародна молодіжна конференція «Астрономія та фізика космосу», Київ, Україна, 23 – 28 квітня 2018 року;
- 18-та Гамовська міжнародна конференція-школа «Астрономія і не тільки: астрофізика, космологія, космомікрофізика, астрофізика частинок, радіоастрономія та астробіологія», Одеса, Україна, 12 – 18 серпня 2018 року;
- ІХ Наукова конференція «Вибрані питання астрономії та астрофізики», присвячена пам'яті Богдана Бабія, Львів, Україна, 1 – 5 жовтня 2018 року;

- 26-та Міжнародна молодіжна конференція «Астрономія та фізика космосу», Київ, Україна, 22 – 27 квітня 2019 року;
- Міжнародна конференція молодих вчених та аспірантів «ІЕФ-2019», Ужгород, Україна, 21 – 24 травня 2019 року;
- Європейський тиждень астрономії та космічної науки (Щорічне засідання Європейського астрономічного товариства, EWASS 2019), Ліон, Франція, 24 – 28 червня 2019 року;
- 27-ма Міжнародна молодіжна конференція «Астрономія та фізика космосу», Київ, Україна, 26 – 30 квітня 2021 року;
- Міжнародна конференція молодих вчених та аспірантів «ІЕФ-2021», Ужгород, Україна, 26 – 28 травня 2021 року;
- Щорічна зустріч Європейського астрономічного товариства (EAS), 28 червня – 2 липня 2021 року (онлайн);
- 50-та Європейська конференція молодих радіоастрономів (YERAC), Гренобль, Франція, 24 – 27 серпня 2021 року;
- Другий український мікрохвильовий тиждень (IEEE UkrMW 2022), Харків, Україна, 14 – 18 листопада 2022 року;
- 23-тя Гамовська міжнародна конференція-школа «Астрономія і не тільки: астрофізика, космологія і гравітація, астрофізика частинок, радіоастрономія, астробіологія та генетика», Одеса, Україна, 21 – 25 серпня 2023 року.

Публікації. Результати дисертації опубліковано у 26 роботах [1 – 26]: в 7 статтях у фахових журналах [1 – 7], 2 статтях у інших виданнях [8 – 9] та 17 тезах конференцій [10 – 26].

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел та одного додатку. Загальний обсяг роботи становить 222 сторінки. Текст роботи містить 66 рисунків, 8 таблиць та 160 найменувань у списку використаних джерел.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ. У вступі обґрунтовано актуальність теми роботи, визначено мету та завдання дослідження, описано методи, необхідні для розв'язання поставлених завдань, а також вказано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Зазначено особистий внесок автора і рівень апробації матеріалів.

У першому розділі «Дослідження дифузного міжзоряного середовища за допомогою низькочастотних рекомбінаційних радіоліній вуглецю» наведено огляд літератури з фізики МЗС і досліджень низькочастотних РРЛ вуглецю. Описано компоненти, які входять до газової фази МЗС, – холодне нейтральне середовище (СNM), тепле іонізоване середовище (WIM), тепле нейтральне середовище (WNM), гаряче іонізоване середовище (НІМ). Зазначено роль міжзоряного вуглецю у фізиці МЗС. Цей елемент, що міститься у багатьох компонентах та об'єктах Галактики, може бути іонізованим ультрафіолетовим (УФ) випромінюванням з довжиною хвилі $91.2 \text{ нм} < \lambda < 110 \text{ нм}$ у холодних, розріджених ділянках середовища, де найбільш рясний елемент – водень – повністю

нейтральний [27]. Дослідження областей іонізованого вуглецю (областей С II) в Галактиці важливі для подальшого вивчення фізичних, хімічних, еволюційних та енергетичних властивостей міжзоряної речовини. У розділі описано основні типи спектральних ліній, за допомогою яких досліджується міжзоряний газ радіоастрономічними методами. Основну увагу приділено РРЛ. Ці лінії формуються внаслідок рекомбінації електрона іоном та подальших переходів цього електрона на більш низькі квантові рівні. Наведено переваги досліджень РРЛ на вкрай низьких частотах (менше 30 МГц). Розглянуто основні результати досліджень низькочастотних ліній. Найбільший обсяг астрофізичної інформації було отримано для напрямку на потужний залишок надвоєї (ЗНН) Кассіопея А (Cas A) [6, 28]. На промені зору до Cas A розташовано комплекс дифузних хмар, поглинання газу в яких під впливом потужного континуального випромінювання від ЗНН і призводить до формування абсорбційних РРЛ. Але дослідження низькочастотних РРЛ вуглецю в інших напрямках Галактики, які формуються на тлі розподіленого власного нетеплового галактичного радіовипромінювання, не менш важливі. Наведено основні результати великомасштабних оглядів у низькочастотних РРЛ вуглецю, що здебільшого були виконані для внутрішніх областей Галактики ($l < 20^\circ$) та при невеликих відхиленнях від галактичної площини ($|b| < 5^\circ$) [29 – 32]. Описано методику проведення та результати огляду РРЛ на радіотелескопі УТР-2, виконаного у 2005 – 2013 роках поблизу частоти 25 МГц [6, 33]. Були досліджені ділянки галактичної площини у напрямках від центра до антицентра Галактики із кроком в 10° . Для деяких позицій було виконано картографування із відхиленням променя УТР-2 від площини до 10° . Вкрай важливим результатом цього огляду стала реєстрація низькочастотних РРЛ вуглецю в усіх спостережуваних напрямках. Узгодження отриманих спектрів вуглецевих ліній із спектрами лінії Н I, вимірними у тих самих напрямках, дало можливість припустити асоціацію областей С II в галактичній площині з хмарами нейтрального гідрогену Н I. Отримані результати спонукали до проведення повного огляду неба з метою визначення розподілу цього газу в Галактиці у більших астрономічних масштабах. Виконання такого огляду й стало метою роботи.

Основні положення розділу викладені в публікаціях автора [5, 6].

У другому розділі «Анени та апаратура для низькочастотної радіоспектроскопії» надається опис інструмента, на якому були виконані дослідження у рамках роботи. Український радіотелескоп УТР-2 є найбільшим за ефективною площиною та найчутливішим низькочастотним радіотелескопом у світі (рис. 1). Він має ефективну площу близько 140000 м^2 , робочий діапазон частот від 8 до 32 МГц, максимальну кутову роздільну здатність $25'$ (на частоті 25 МГц), великий динамічний діапазон, багатопроменевість, стійкість до завад, гнучку конфігурацію та високу стабільність роботи усіх систем та вузлів [34]. Все це робить УТР-2 найкращим інструментом для високочутливої радіоспектроскопії МЗС.

Також наведено опис приймальної апаратури, що використовується на УТР-2 при дослідженнях низькочастотних РРЛ вуглецю, – цифрових автокорелометрів (ЦК) та цифрових спектроаналізаторів DSP-Z. Приймач на базі 4096-канального ЦК, що має смугу аналізу близько 1 МГц та частотну роздільну здатність до 0.1 кГц ,

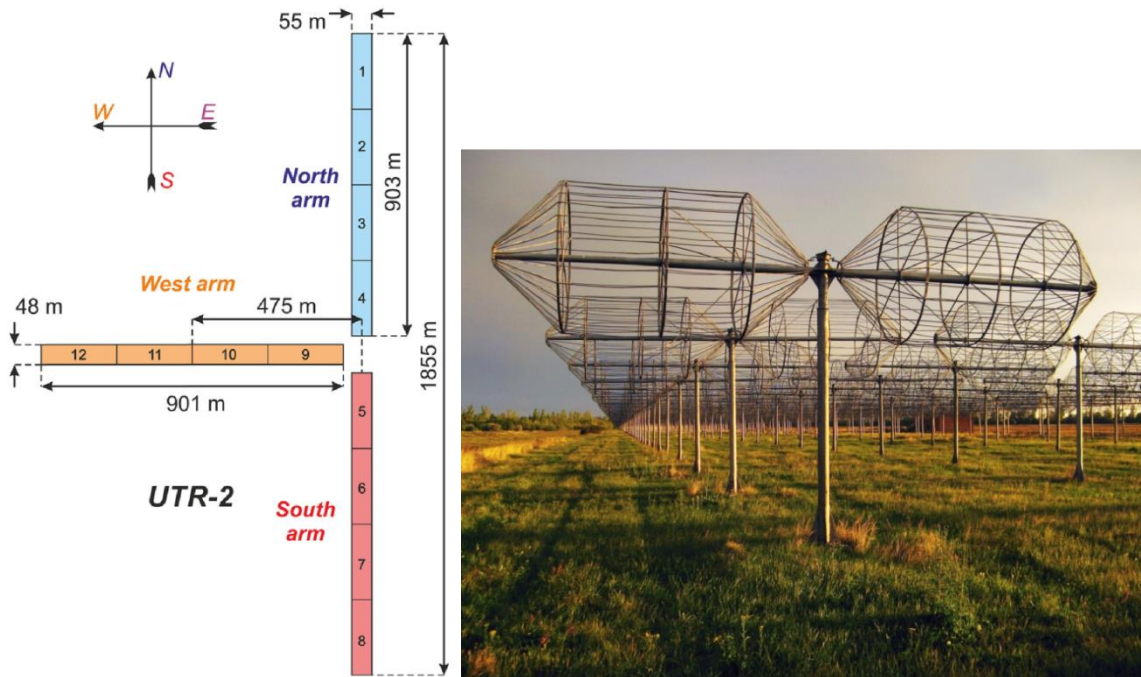


Рис. 1. *Ліворуч* – конфігурація радіотелескопа УТР-2; *праворуч* – антена «Північ – Південь» радіотелескопа УТР-2 [34].

дозволяє виконувати радіоспектроскопічні спостереження із вкрай високою чутливістю [6]. Багатоканальні цифрові спектроаналізатори DSP-Z, що були впроваджені на УТР-2 у 2010 році, можуть працювати у суцільній робочій смузі частот УТР-2, мають 16-бітне квантування, що забезпечує великий динамічний діапазон приймача (рис. 2) [2, 35]. Смуга аналізу розбивається на 8192 частотних канали, частотна роздільна здатність складає 4 кГц.

Застосування DSP-Z при спостереженнях низькочастотних РРЛ вуглецю багатократно підвищує чутливість вимірювань. Широка смуга аналізу дозволяє одночасно спостерігати велику кількість РРЛ (більше двохсот). Слід зауважити, що відстані між сусідніми РРЛ скорочуються зі зменшенням частоти, тому є можливість усереднення великої кількості одночасно спостережуваних ліній для підвищення чутливості вимірювань ΔS ($\Delta S \propto \sqrt{N}$, де N – кількість усереднених ліній) і відповідного збільшення часу накопичення Δt ($\Delta t \propto N$).

При реалізації реального часу накопичення $\Delta t = 100$ годин при очікуваній ширині РРЛ у Галактиці на частотах менше 30 МГц $\Delta f = 4$ кГц, можна зареєструвати РРЛ із мінімально можливою інтенсивністю ε [36]:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{\Delta t \Delta f}} = \sqrt{\frac{1}{360000 \text{ с} \cdot 4000 \text{ Гц}}} = 2.6 \cdot 10^{-5}.$$

У разі реалізації $\Delta t = 500$ годин $\varepsilon = 1.2 \cdot 10^{-5}$, а в разі $\Delta t = 1000$ годин $\varepsilon = 8.3 \cdot 10^{-6}$. Це рекордно висока на даний час чутливість, з якою можна спостерігати низькочастотні РРЛ серед усіх низькочастотних радіотелескопів світу.

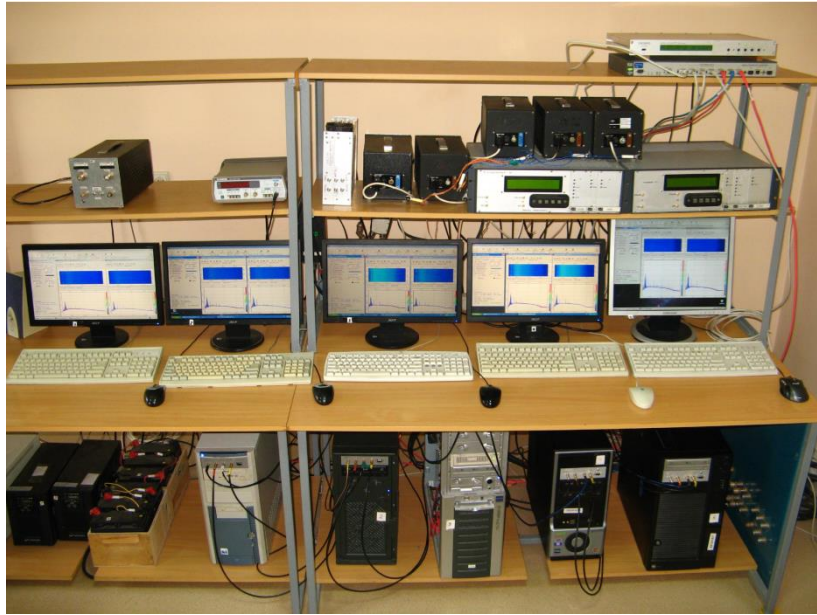


Рис. 2. П'ять комплектів цифрових спектроаналізаторів DSP-Z, встановлених на УТР-2 [2].

Основні положення та результати розділу викладені в публікаціях автора [1, 3, 4, 6].

У третьому розділі «Радіоспектроскопія обраних об'єктів Галактики в низькочастотних рекомбінаційних радіолініях вуглецю» представлені результати досліджень низькочастотних РРЛ вуглецю в напрямках дискретних радіоджерел. Наведено результати спостережень низькочастотних РРЛ вуглецю на УТР-2 за допомогою DSP-Z у напрямку Cas A, при яких було відпрацьовано методику високочутливих, широкосмугових радіоспектроскопічних спостережень. На рис. 3 наведено спектр, що містить близько 90 α -РРЛ вуглецю в діапазоні частот 20 – 30 МГц, отриманий при реальному часі накопичення близько 30 хвилин.

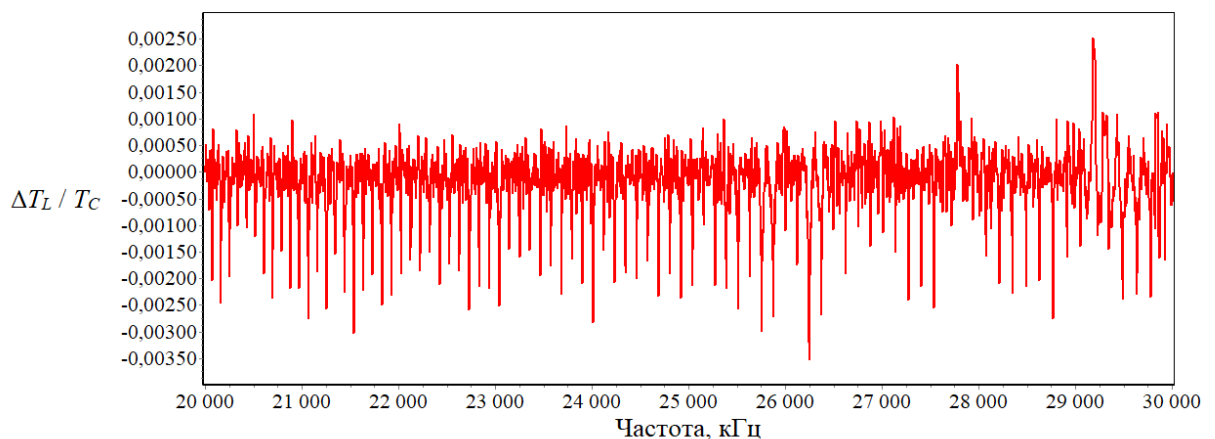


Рис. 3. Спектр серії РРЛ вуглецю С602 α – С689 α , отриманий у напрямку Cas A в смузі 20 – 30 МГц на антені «Північ – Південь» радіотелескопа УТР-2 за допомогою DSP-Z 18 жовтня 2017 року. Реальний час накопичення складає 31 хвилину.

Також у цьому розділі описано астрофізичний аналіз радіоспектроскопічних даних, отриманих на УТР-2 за допомогою 4096-канального ЦК у 2002 – 2003 роках у напрямку емісійної туманності S140 [7] і в напрямку гігантської оболонки холодного нейтрального водню GSH 139-03-69. На рис. 4 наведено спектр усередненої серії РРЛ вуглецю C627 α – C637 α , отриманий у напрямку S140 на антені «Північ – Південь» УТР-2 за допомогою ЦК поблизу частоти 26 МГц.

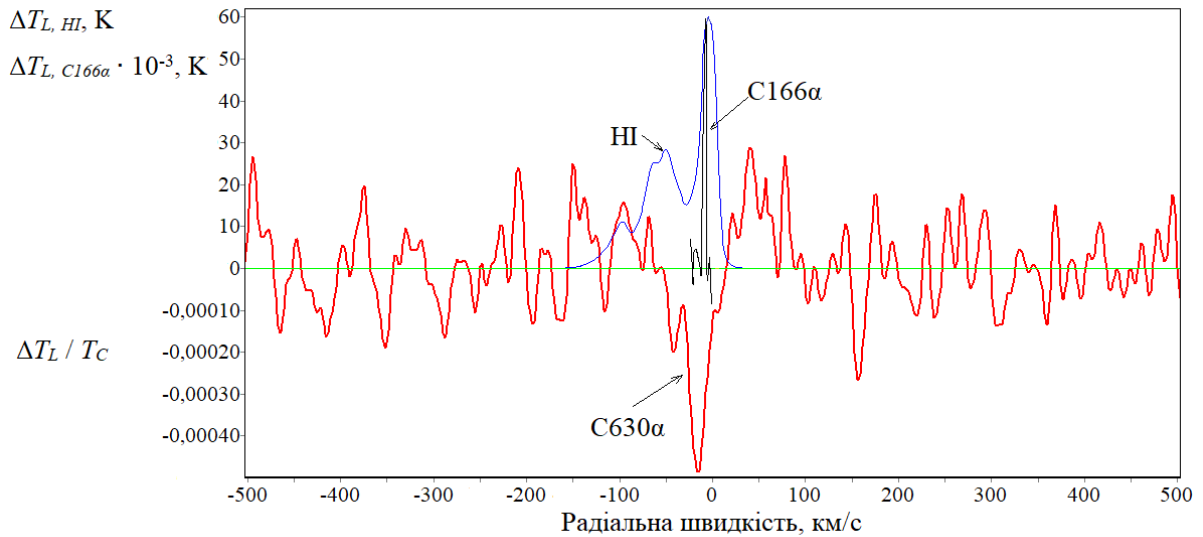


Рис. 4. Червона лінія – Усереднений спектр серії РРЛ вуглецю C627 α – C637 α , виміряний у напрямку S140, ефективний час накопичення складає 108 годин. Синя лінія – Спектр лінії HI, виміряний у напрямку S140 (дані взято з огляду LAB [37] та синтезовано до кутової роздільної здатності 12° × 12°). Чорна лінія – Спектр РРЛ вуглецю C166 α , виміряний у напрямку S140, час накопичення 15 годин [38].

Факт реєстрації низькочастотних РРЛ вуглецю із схожими характеристиками у напрямках, зміщених на 3° по схиленню від напрямку на S140, заперечує зв'язок області C II із самою туманністю S140. Добре узгодження даних РРЛ із даними HI [37] говорить на користь формування низькочастотних РРЛ вуглецю в областях, асоційованих із хмарами нейтрального водню HI на промені зору в місцевому МЗС в околі Сонця (про що свідчить радіальна швидкість РРЛ близько 0 км/с).

Шляхом порівняння радіальних швидкостей декаметрових і дециметрових РРЛ вуглецю (лінія C166 α , [38]) вдалося зробити висновок про те, що області C II у напрямку S140, що відповідають за декаметрові і дециметрові лінії, просторово не корелюють між собою. Дециметрові вуглецеві лінії формуються у високощільній області C II навколо самої туманності, іонізованої потужним УФ-випромінюванням від найближчих потужних зір. Декаметрові лінії формуються в областях C II, просторово асоційованих із хмарним нейтральним воднем HI та іонізованих стороннім УФ-випромінюванням із довжиною хвилі 91.2 нм < λ < 110 нм та під дією механізму діелектронно-подібної рекомбінації (рис. 5). Інтенсивності декаметрових і дециметрових РРЛ вуглецю мають різну залежність від частоти, що обумовлено різницею параметрів фізичних умов, відстежуваних двома типами ліній (рис. 6).

На рис. 7 наведено спектр усередненої серії РРЛ вуглецю C627 α – C637 α , зареєстрований у напрямку GSH 139-03-69 за допомогою ЦК поблизу частоти 26 МГц. Окрім компонентів радіальної швидкості –50 км/с і 0 км/с, які відповідають

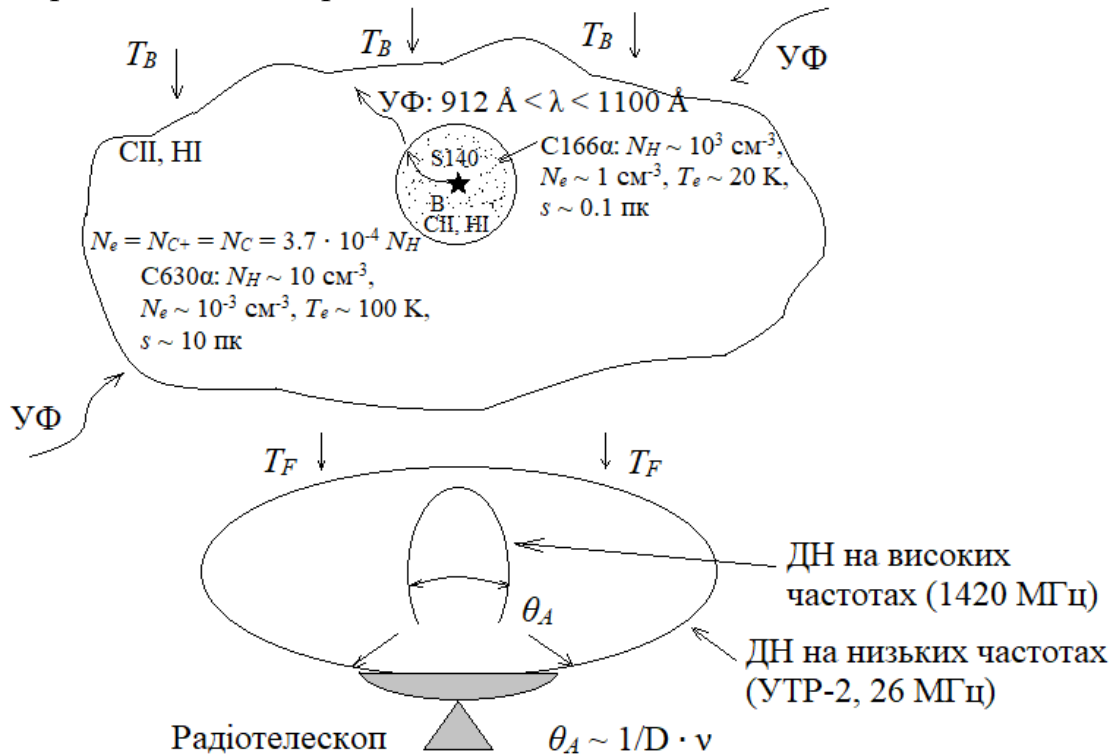


Рис. 5. Багаточастотна модель міжзоряного комплексу: туманність S140 – дифузна хмара Н І із іонізованим вуглецем.

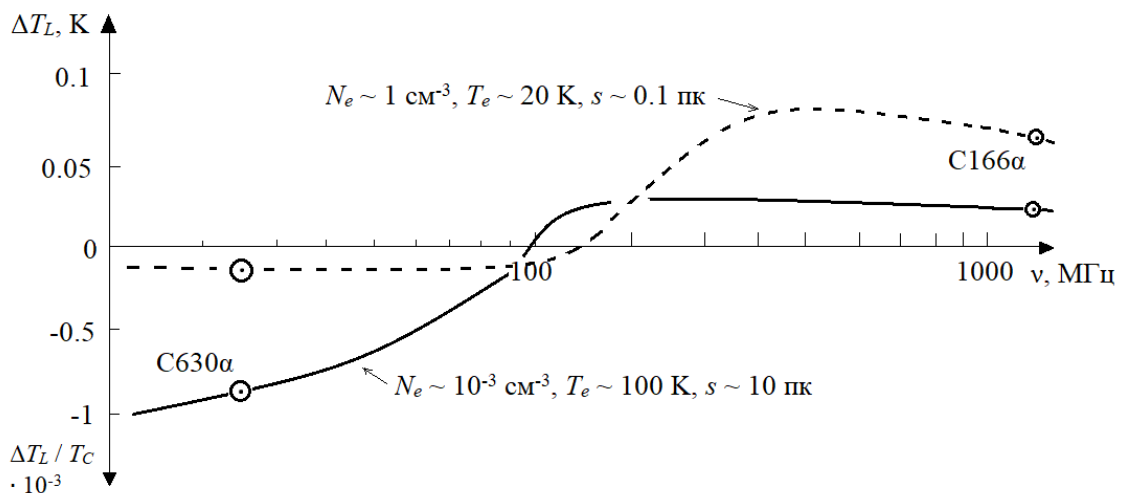


Рис. 6. Частотна залежність інтенсивностей РРЛ, що були сформовані у холодних, високощільних областях С ІІ та в дифузних областях С ІІ, асоційованих із нейтральним гідрогеном Н І.

газу в рукавах Персея й Оріона, в спектрі також присутній слабкий компонент лінії з радіальною швидкістю –80 км/с, який відповідає зовнішньому рукаву Галактики.

При цій радіальній швидкості в напрямку GSH 139-03-69 було зареєстровано лінію самопоглинання Н І [39]. Характеристики зареєстрованих РРЛ вуглецю в цьому напрямку і в напрямках, зміщених на 8° по галактичній довготі й галактичній широті, мають схожі значення й узгоджуються з характеристиками лінії Н І.

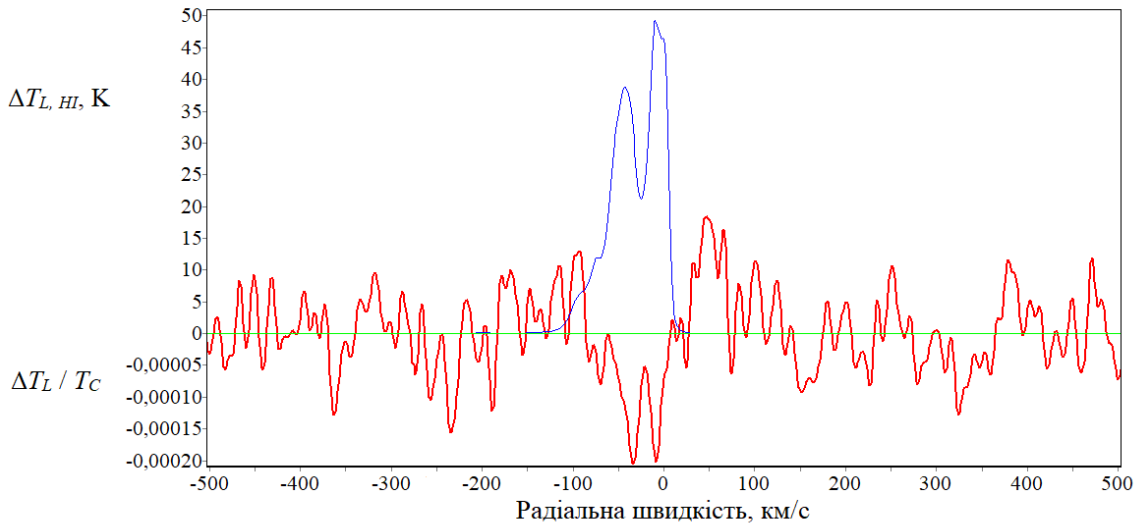


Рис. 7. Червона лінія – Усереднений спектр серії РРЛ вуглецю С627α – С637α, виміряний у напрямку GSH 139-03-69, ефективний час накопичення складає 340 годин. Синя лінія – Спектр лінії Н І, виміряний у напрямку GSH 139-03-69 та синтезований до кутової роздільної здатності $12^\circ \times 12^\circ$.

У рамках визначення фізичних умов в областях С II були використані отримані значення інтегральних інтенсивностей ліній, які безпосередньо залежать від електронної температури та електронної густини області С II:

$$I_L = \int_V \frac{\Delta T_L}{T_C} \approx -2 \cdot 10^{-6} \frac{N_e^2 s}{T_e^{2/5}} b_n \beta_n, \quad (1)$$

де $\frac{\Delta T_L}{T_C}$ – відносна інтенсивність ліній, N_e – електронна густина в см^{-3} , T_e – електронна температура в К, s – розмір хмари в пк, b_n – коефіцієнт відхилення заселеностей рівнів від локальної термодинамічної рівноваги і β_n – коефіцієнт, що дає поправку на стимульовану емісію. Спостережувані значення I_L були використані для порівняння з модельними значеннями I_L , розрахованими за допомогою рівняння (1) шляхом ітераційного аналізу різних комбінацій T_e , N_e , s та $b_n \beta_n$. Найкращим чином для напрямків і S140, і GSH 139-03-69 результатам наших спостережень відповідають значення $T_e = 50 - 100$ К при $N_e = 0.01 \text{ см}^{-3}$, при $s = 10$ пк для напрямку S140 і $s = 5 - 7$ пк для напрямку GSH 139-03-69. Порівняння даних обох типів ліній для обох напрямків дозволило зробити висновок про те, що області С II асоційовані з хмарами Н І (які мають типові розміри $s = 10$ пк), що узгоджується із загальноприйнятою моделлю областей С II.

Основні положення та результати розділу викладені у публікаціях автора [6, 7, 15 – 17, 23].

У четвертому розділі «Методи діагностики міжзоряного середовища за допомогою низькочастотних рекомбінаційних радіоліній вуглецю» наведено

опис методу діагностики МЗС шляхом виконання повного огляду неба в низькочастотних РРЛ вуглецю. Висвітлено астрофізичні задачі, що можуть бути успішно вирішені при виконанні повного огляду. До них можна віднести: визначення просторового розподілу областей С II в Галактиці – як в межах площини, так і далеко за її межами (в астрономічних обсягах, що в десятки разів перевищують обсяги усіх попередніх оглядів у низькочастотних РРЛ), отримання залежностей характеристик РРЛ вуглецю від частоти і просторової координати, з'ясування за отриманими характеристиками ліній діапазонів значень фізичних умов областей С II, оцінка відстаней до цих областей та їх розміру, з'ясування кінематичних характеристик іонізованого газу в Галактиці та з'ясування зв'язку областей С II із іншими компонентами МЗС.

Також у розділі розглянуто вимоги до реєструючої апаратури. Частотна роздільна здатність в 4 кГц не є оптимальною для прецизійного аналізу профілів ліній, але є достатньою для визначення просторового розподілу поглинання у РРЛ вуглецю. Значення часової роздільної здатності в 100 мілісекунд буде оптимальним як для скорочення часу на обробку даних, так і для зменшення втрат корисних даних у випадку потрапляння до смуги аналізу широкосмугової завади. За допомогою підсилювачів перед входами DSP-Z можна встановити рівень сигналу на 20 дБ вищим, ніж власний шум самих спектроаналізаторів, що забезпечить загальний динамічний діапазон близько 90 дБ для усієї смуги аналізу.

У розділі наведено обґрунтування стратегії повного огляду, розглянуті фізичні та хімічні процеси в CNM, в яких іонізований вуглець грає важливу роль як основний охолоджувач газу (у тому числі через випускання інфрачервоної лінії тонкої структури [C II] 158 мк [40]). Обговорюються питання структури та іонізації газу на високих галактичних широтах. Розглянуто вертикальну шкалу висот газу H I, характеристики лінії H I як у межах площини, так і за її межами.

Особлива увага в розділі приділяється розробці алгоритму огляду. Найбільш ефективною для досягнення цілей огляду буде методика проведення спостережень із нерухомою діаграмою направленості (ДН) радіотелескопа методом сканування небесної сфери за рахунок добового обертання Землі. ДН встановлюється у зенітне положення по меридіану і відносно обраного схилення. За добу ДН повністю охоплює спостереженнями доступні ділянки небесної сфери для прямих піднесень від 0^h до 24^h, двічі при цьому перетинаючи галактичну площину, а також охоплюючи й високоширотні області, спостереження низькочастотних РРЛ для яких досі не виконувались. При задіянні під час виконання огляду багатопроменевого режиму роботи радіотелескопа УТР-2 (ДН антени «Північ – Південь» розбивається на п'ять променів розміром $\alpha \times \delta = 12^\circ \times 20'$ кожний, рознесених між собою на 30' по схиленню), буде скануватися ділянка шириною 2.5° відносно обраного схилення. Методика обробки отриманих даних буде включати розбивку даних на проміжки в 1^h відносно прямого піднесення (1^h – 2^h, 2^h – 3^h і т.д.) та усереднення у межах певного проміжку даних, отриманих при кожному сеансі спостережень. Характеристики РРЛ будуть використані для визначення фізичних параметрів областей С II.

Основні положення розділу викладені в публікаціях автора [1, 4, 22, 24, 26].

У п'ятому розділі «Огляд ділянок Галактики в режимі великомасштабного вивчення розподілу іонізованого вуглецю» описані результати спостережень низькочастотних РРЛ вуглецю, виконаних на радіотелескопі УТР-2 у рамках виконання повного огляду. Застосування описаної у четвертому розділі методики спостережень із нерухомою ДН можна використовувати не лише для спектроскопії в РРЛ, а й для дослідження об'єктів, що відносяться до інших типів космічного радіовипромінювання – континуального, імпульсного, спорадичного, поляризаційного. Наведено результати спостережень близзенітної ділянки Північного неба (місцевий зеніт відповідає $\delta = +49^\circ$), виконаних на УТР-2 за допомогою DSP-Z 13 – 25 грудня 2015 року. Мінімальному рівню завад відповідали ділянки прямих піднесенень від 1^h ($l = 124^\circ$, $b = -13^\circ$) до 9^h ($l = 169^\circ$, $b = +41^\circ$), проходження ДН через які відповідало місцевому часу від 19:00 до 03:00 (UTC+2). На рис. 8 наведено місцезрештування досліджуваних ділянок у Галактиці. Підсумкові спектри низькочастотних РРЛ вуглецю, що були отримані, усереднені у смугах 18 – 22 і 23 – 27 МГц відносно обраних центральних частот 20 і 25 МГц (у смузі 18 – 22 МГц усереднено 47 α -переходів РРЛ вуглецю, в смузі 23 – 27 МГц – 35 α -переходів). Усереднення такої великої кількості ліній дозволило досягти чутливості вимірювань порядку 10^{-5} .

Низькочастотні РРЛ вуглецю були зареєстровані як у межах галактичної площини (рис. 9), так і далеко за її межами ($-13^\circ < b < +31^\circ$, рис. 10, 11). Лінії спостерігалися з відносною інтенсивністю від $8 \cdot 10^{-5}$ до $2 \cdot 10^{-4}$ та мали ширини від 4 до 7 кГц (50 – 100 км/с). Радіальні швидкості зареєстрованих ліній відповідали газу в рукаві Персея (для ділянок, де промінь телескопа перетинає галактичну площину) та місцевому газу в околі Сонця (за межами площини).

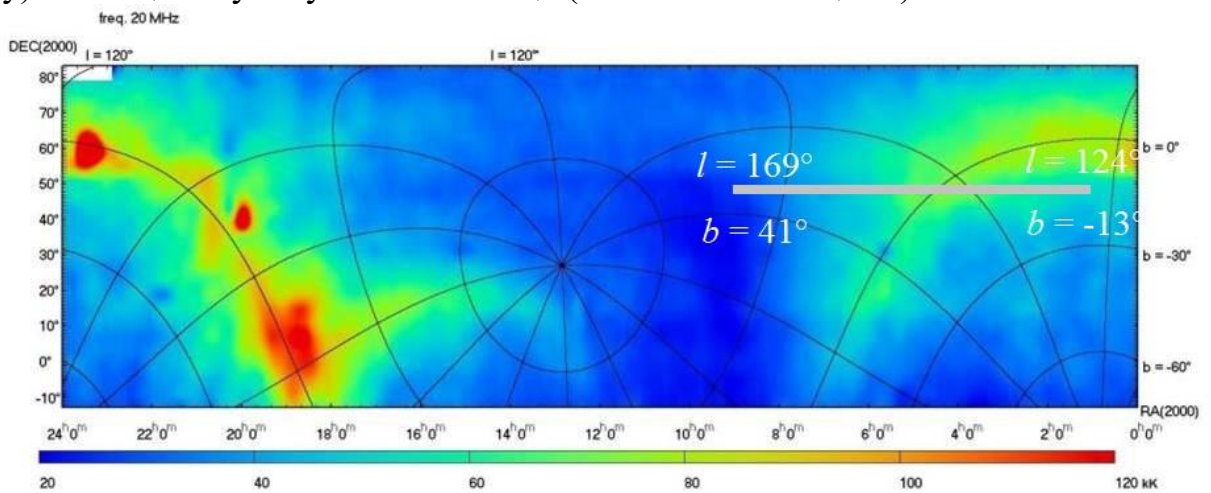


Рис. 8. Положення досліджуваних ділянок 1^h ($l = 124^\circ$; $b = -13^\circ$) – 9^h ($l = 169^\circ$; $b = +41^\circ$) відносно площини Галактики на мапі радіоконтинууму.

У рамках дослідження просторового зв'язку зареєстрованих областей С II із іншими компонентами МЗС, було проведено порівняльний аналіз спектрів РРЛ із спектрами лінії Н I, отриманими в ході виконання огляду LAB [37], синтезованими до просторової роздільної здатності антени «Північ – Південь». Було виявлено добре

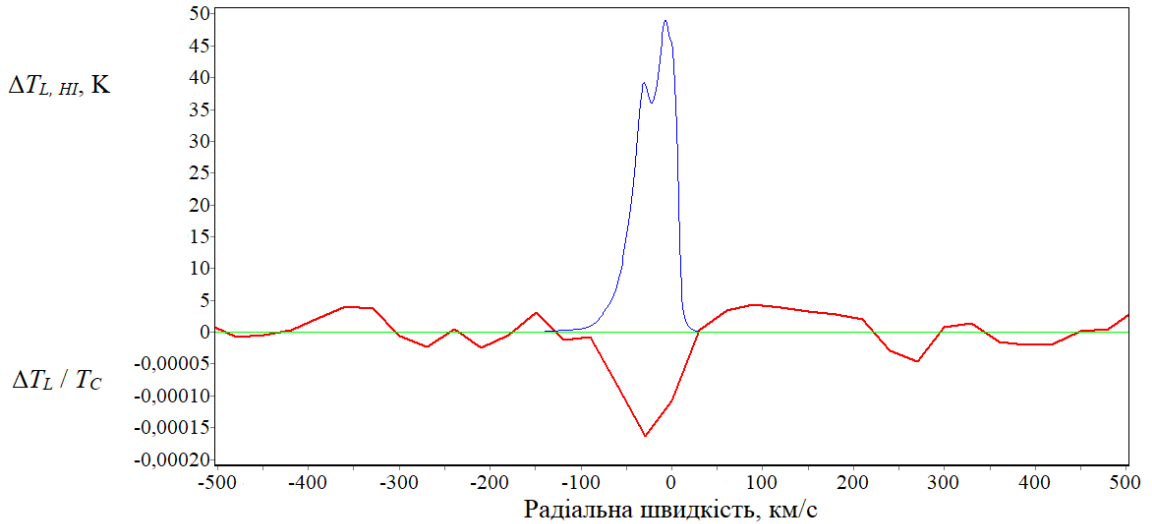


Рис. 9. Червона лінія – Спектр усередненої серії РРЛ вуглецю С668а – С714а (18 – 22 МГц) у ділянці 4^h – 5^h ($l = 155^\circ$; $b = 0^\circ$). Ефективний час накопичення складає 503 години. Синя лінія – Спектр лінії Н І, просторово усереднений у ділянці середовища 4^h – 5^h із синтезованим розміром ДН $12^\circ \times 12^\circ$.

узгодження характеристик обох типів ліній та однаковий характер змін характеристик ліній як функцій галактичної широти для $|b| < 10^\circ$ (для $|b| > 10^\circ$ прецизійний аналіз був ускладнений нестабільністю базової лінії внаслідок меншої чутливості та меншого часу накопичення). За спостережуваними інтегральними інтенсивностями ліній було виконано аналіз фізичних умов в областях С II подібно до аналізу, описаному в третьому розділі для напрямків S140 і GSH 139-03-69. Шляхом проведення ітераційних розрахунків за допомогою рівняння (1) для різних комбінацій T_e , N_e , s і $b_n \beta_n$, найкращим чином з експериментальними даними узгоджуються комбінації з $T_e = 50 - 100$ К при $N_e \leq 0.01$ см⁻³ та $s = 5 - 10$ пк. Ці значення є типовими для газу Н І у фазі CNM, де водень нейтральний, а вуглець може бути частково або повністю іонізованим УФ-випромінюванням, космічними або рентгенівськими променями.

Факт асоціації областей С II з хмарами Н І дозволяє використати прецизійний метод визначення параметрів середовища в областях формування обох типів ліній [6]. Спостережувана інтенсивність лінії Н І пов'язана із параметрами фізичних умов у хмарі Н І рівнянням

$$N_H \approx n_H s \approx 3.88 \cdot 10^{17} T_K \int \tau_H(\nu) d\nu, \quad (2)$$

де n_H – об'ємна концентрація водню, T_K – його кінетична температура. Цьому рівнянню відповідає вкрай широкий діапазон фізичних умов: $T = 10 - 1000$ К, $s = 0.1 - 100$ пк, $n_H = 1 - 1000$ см⁻³. При реєстрації у тій самій хмарі РРЛ вуглецю додається ще два рівняння – для інтегральної інтенсивності (1) та ширини РРЛ [6]

$$\Delta\nu = N_e n^{5.2} / T^{0.1}. \quad (3)$$

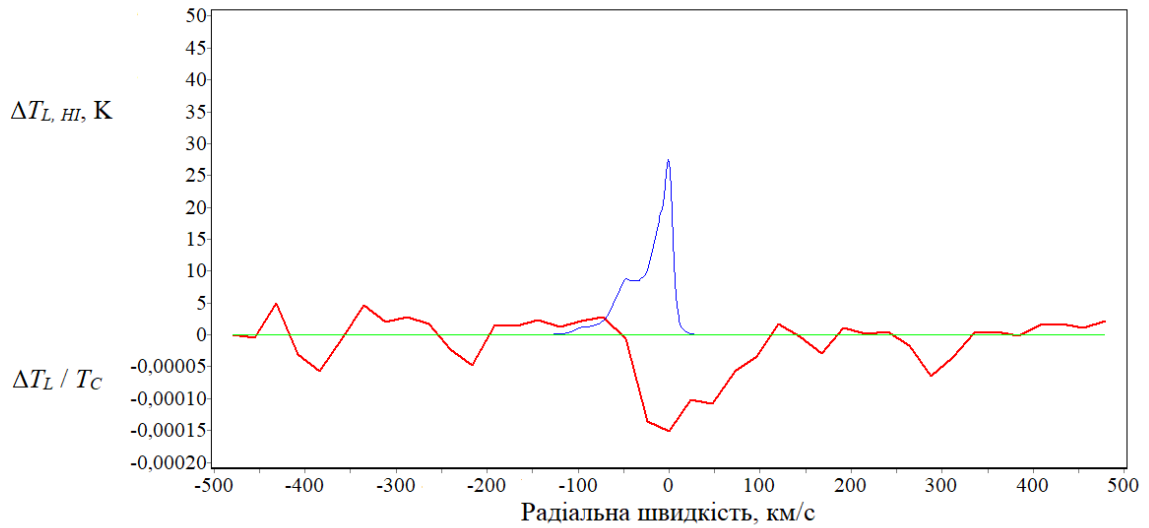


Рис. 10. Червона лінія – Спектр усередненої серії РРЛ вуглецю С624 – С658α (23 – 27 МГц) у ділянці 1^h – 2^h ($l = 129^\circ$; $b = -12^\circ$). Ефективний час накопичення складає 304 години. Синя лінія – Спектр лінії Н I, просторово усереднений у ділянці середовища 1^h – 2^h із синтезованим розміром ДН $12^\circ \times 12^\circ$.

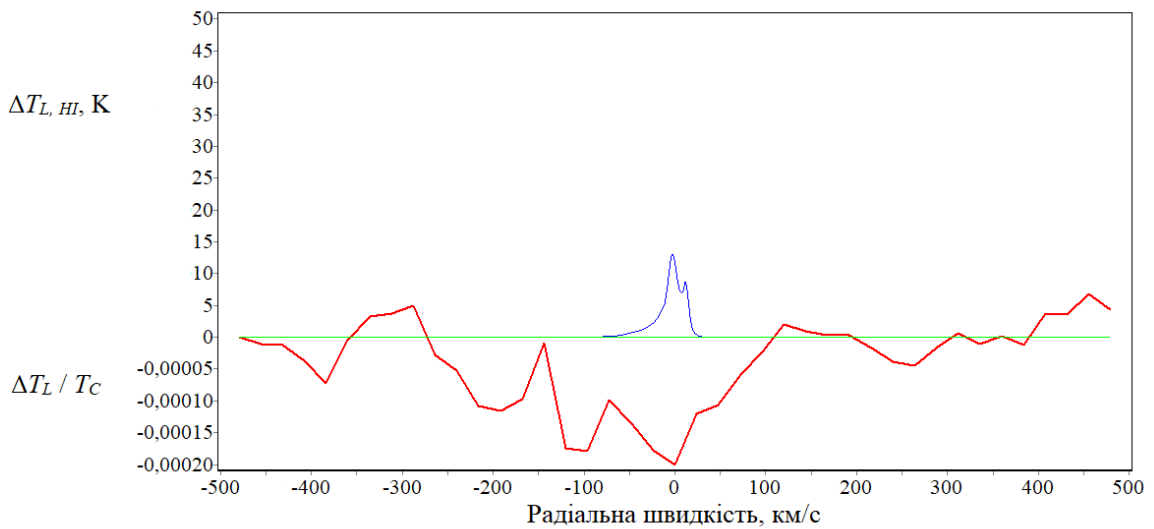


Рис. 11. Червона лінія – Спектр усередненої серії РРЛ вуглецю С624 – С658α (23 – 27 МГц) у ділянці 7^h – 8^h ($l = 168^\circ$; $b = +27^\circ$). Ефективний час накопичення складає 388 годин. Синя лінія – Спектр лінії Н I, просторово усереднений у ділянці середовища 7^h – 8^h із синтезованим розміром ДН $12^\circ \times 12^\circ$.

Таким чином, окрім одного рівняння (2) для інтенсивності лінії Н I з трьома невідомими, додаються ще два рівняння (1) і (3), за допомогою яких можна отримати більш визначений діапазон параметрів фізичних умов ($T_e = 50 - 100$ К, $N_e \leq 0.01$ см⁻³, $s = 5 - 10$ пк).

Основні результати розділу викладені в публікаціях автора [22, 24, 26].

Додаток А містить список опублікованих праць за матеріалами роботи та відомості про апробацію результатів дисертаційного дослідження.

ВИСНОВКИ

Головні результати виконання дисертаційної роботи полягають у наступному:

1. Розроблено високочутливу методологію радіоспектроскопії МЗС у РРЛ високозбуджених атомів іонізованого вуглецю ($n > 600$, $\nu < 30$ МГц) на основі використання найбільшого у світі декаметрового радіотелескопа УТР-2 та багатоканальних цифрових спектроаналізаторів нового покоління DSP-Z.
2. Вперше зареєстровано РРЛ вуглецю на декаметрових хвилях у значній частині галактичного простору – у десятки разів більшому об’ємі, ніж досліджувалось раніше. Вдалося виявити лінії як поблизу галактичної площини ($|b| = 0^\circ - 5^\circ$), так і далеко за її межами ($|b| = 5^\circ - 30^\circ$). Відносна інтенсивність ліній поглинання має порядок $10^{-4} - 10^{-5}$ від рівня континууму, ширина ліній лежить у межах 4 – 7 кГц (50 – 100 км/с).
3. Знайдено високий ступінь кореляції параметрів зареєстрованих ліній вуглецю (за інтенсивністю, шириною, радіальною швидкістю) із лінією нейтрального гідрогену НІ з урахуванням різної кутової роздільної здатності відповідних радіотелескопів на частотах 20 – 30 та 1420 МГц. Для узгодження кутових роздільних здатностей дані з розподілу НІ були усереднені до розміру $12^\circ \times 12^\circ$.
4. Вперше показано, що реєстрація РРЛ вуглецю та висока кореляція їх параметрів із лініями НІ дає унікальну можливість однозначного з’ясування фізичних параметрів дифузних гідрогенних хмар, які є складовими компонентами спіральних рукавів Галактики. Визначено, що кінетична та електронна температури таких хмар становлять 50 – 100 К, електронна густина становить менше 0.01 см^{-3} , об’ємна густина гідрогену менше 35 см^{-3} , розмір хмар уздовж променя зору становить 5 – 10 пк. У цій моделі областей формування ліній весь вуглець іонізований ($C/H \approx 3 \cdot 10^{-4}$) УФ-випромінюванням на довжинах хвиль $91.2 \text{ нм} < \lambda < 110 \text{ нм}$, а гідроген практично повністю нейтральний.
5. Впроваджено апаратуру та нові методи пошуку і досліджень РРЛ, що вирізняються високими чутливістю за густиною потоку та яскравісною температурою, кутовою роздільною здатністю, широкою смугою аналізу. Це дає можливість одночасно спостерігати від десятків до сотень РРЛ з високими частотною та часовою роздільною здатностями, завадостійкістю та великим динамічним діапазоном. Проведено довготривалі оглядові спостереження (тисячі годин) на радіотелескопі УТР-2 за програмою пошуку та досліджень РРЛ з метою визначення великомасштабного розподілу іонізованого вуглецю.
6. Доведено актуальність і можливість виконання повного огляду доступних областей Галактики у низькочастотних РРЛ вуглецю. Це стосується як великомасштабного огляду із кутовою роздільною здатністю $\sim 10^\circ$ (антени «Північ – Південь» і «Захід – Схід» радіотелескопа УТР-2 та радіоінтерферометрів системи УРАН), так і вивчення тонкої структури

розподілу С II із роздільною здатністю $< 1^\circ$ (УТР-2 у кореляційному режимі, ГУРТ, LOFAR, NenuFAR).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті, опубліковані у фахових реферованих виданнях

1. Konovalenko, A. A., Stepkin, S. V., Mukha, D. V., and **Vasilkovskiy, E. V.**, “Tools and Methods of Low-Frequency Radio Recombination Lines Investigations”, *Odessa Astronomical Publications*, vol. 29, p. 187, 2016. doi:10.18524/1810-4215.2016.29.85213.
2. Zakharenko, V., Konovalenko, A., Zarka, P., Ulyanov, O., Sidorchuk, M., Stepkin, S., Koliadin, V., Kalinichenko, N., Stanislavsky, A., Dorovsky, V., Shepelev, V., Bobnov, I., Yerin, S., Melnik, V., Koval, A., Shevchuk, N., Vasylieva, I., Mylostna, K., Shevtsova, A., Skoryk, A., Kravtsov, I., Volvach, Y., Plakhov, M., Vasilenko, N., **Vasyilkivskiy, Y.**, Vavriv, D., Vinogradov, V., Kozhin, R., Kravtsov, A., Bulakh, E., Kuzin, A., Vasilyev, A., Ryabov, V., Reznichenko, A., Bortsov, V., Lisachenko, V., Kvasov, G., Mukha, D., Litvinenko, G., Brazhenko, A., Vashchishin, R., Pylaev, O., Koshovyy, V., Lozinsky, A., Ivantyshyn, O., Rucker, H. O., Panchenko, M., Fisher, G., Lecacheux, A., Denis, L., Coffre, A., Griebmeier, J.-M., “Digital Receivers for Low-Frequency Radio Telescopes UTR-2, URAN, GURT”, *Journal of Astronomical Instrumentation*, vol. 5, no. 4, 2016. doi:10.1142/S2251171716410105. (Scopus, Q3)
3. Konovalenko, A., Zarka, P., Rucker, H. O., Zakharenko, V., Ulyanov, O., Sidorchuk, M., Stepkin, S., Melnik, V., Kalinichenko, N., Stanislavsky, A., Tokarsky, P., Koliadin, V., Shepelev, V., Dorovsky, V., Bubnov, I., Yerin, S., Reznichenko, A., Litvinenko, G., Shevchuk, N., Koval, A., Vasylieva, I., Mylostna, K., Skoryk, A., Shevtsova, A., Volvach, Y., **Vasilkovskiy, E.**, Ryabov, V., Lecacheux, A., Denis, L., Panchenko, M., Fisher, G., Imai, M., Griebmeier, J.-M., Mann, G., Litvinenko, O., Brazhenko, A., Vashchishin, R., Frantsuzenko, A., Koshovy, V., Lozinsky, A., Ivantyshyn, O., “Multi-antenna observations in the low-frequency radio astronomy of solar system objects and related topics studies”, *Austrian Academy of Sciences Press*, 2017, Vienna, p. 467 – 478, DOI: 10.1553/PRE8s467.
4. Konovalenko, A. A., Stepkin, S. V., and **Vasilkovskiy, E. V.**, “Low-frequency radio recombination lines: observations and data processing”, *Kosmichna Nauka i Tekhnologiya*, vol. 23, no. 1, pp. 50–53, 2017. doi:10.15407/knit2017.01.050. (Web of Science)
5. Konovalenko, O. O., Zakharenko, V. V., Lytvynenko, L. M., Ulyanov, O. M., Sidorchuk, M. A., Stepkin, S. V., Shepelev, V. A., Zarka, P., Rucker, H. O., Lecacheux, A., Panchenko, M., Bruck, Yu. M., Tokarsky, P. L., Bubnov, I. M., Yerin, S. M., Koliadin, V. L., Melnik, V. M., Kalinichenko, M. M., Stanislavsky, O. O., Dorovsky, V. V., Khristenko, O. D., Shevchenko, V. V., Belov, O. S., Gridin, A. O., Antonov, O. V., Bovkun, V. P., Reznichenko, O. M., Bortsov, V. M., Kvasov, G. V., Ostapchenko, L. M., Shevchuk, M. V., Shevchenko, V. A., Yatskiv, Ya. S., Vavilova, I. B., Braude, I. S.,

Shkuratov, Y. G., Ryabov, V. B., Pidgorny, G. I., Tymoshevsky, A. G., Lytvynenko, O. O., Galanin, V. V., Ryabov, M. I., Brazhenko, A. I., Vashchishin, R. V., Frantsuzenko, A. V., Koshovy, V. V., Ivantyshyn, C. L., Lozinsky, A. B., Kharchenko, B. S., Vasylieva, I. Y., Kravtsov, I. P., **Vasylykivskiy, Y. V.**, Litvinenko, G. V., Mukha, D. V., Vasylenko, N. V., Shevtsova, A. I., Miroshnichenko, A. P., Kuhai, N. V., Sobolev, Ya. M., Tsvyk, N. C., “The Founder of the Decameter Radio Astronomy in Ukraine Academician of NAS of Ukraine Semen Yakovych Braude is 110 Years Old: History of Creation and Development of the National Experimental Base for the Last Half Century”, *Radio Physics and Radio Astronomy*, vol. 26, no. 1, pp. 5–73, 2021. doi:10.15407/rpra26.01.005. (Scopus, Q4)

6. Stepkin, S. V., Konovalenko, O. O., **Vasylykivskiy, Y. V.**, and Mukha, D. V., “Interstellar Medium and Decameter Radio Spectroscopy”, *Radio Physics and Radio Astronomy*, vol. 26, no. 4, pp. 314–325, 2021. doi:10.15407/rpra26.04.314. (Scopus, Q4)
7. **Vasylykivskiy, Y. V.**, Stepkin, S. V., and Konovalenko, O. O., “The low-frequency carbon radio recombination lines in medium toward S140 nebula”, *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso*, vol. 53, no. 1, pp. 17–27, 2023. doi:10.31577/caosp.2023.53.1.17. (Scopus, Q3)

Публікації у інших виданнях

8. Konovalenko, A. A., Stepkin, S. V., and **Vasilkovskiy, E. V.**, “Low-frequency radio recombination lines investigations”, *2016 II International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF)*, Kharkiv, Ukraine, 2016, pp. 218 – 221, doi: 10.1109/YSF.2016.7753841. (Scopus)
9. **Vasylykivskiy, Y. V.**, Konovalenko, O. O., and Stepkin, S. V., “Broadband studies of decameter carbon radio recombination lines toward Cygnus A and Perseus A radio galaxies”, *2022 IEEE 2nd Ukrainian Microwave Week (UkrMW)*, Ukraine, 2022, p. 1 – 5, DOI: 10.1109/UkrMW58013.2022.10037153. (Scopus)

Публікації у матеріалах і тезах конференцій

10. Konovalenko, A. A., Stepkin, S. V., and **Vasilkovskiy, E. V.**, “Tools and observational methods of low-frequency radio recombination lines investigations”, *Book of Abstracts, 16th Gamow Summer School: “Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology, Cosmomicrophysics, Astroparticle Physics, Radioastronomy and Astrobiology”*, Odesa, Ukraine, August 14 – 20, 2016, P.29.
11. Konovalenko, A. A., Stepkin, S. V., and **Vasilkovskiy, E. V.**, “Low-frequency radio recombination lines: observations and data processing”, *Book of Abstracts, International Conference NAO-195 “Actual Questions of Ground-based Observational Astronomy”*, Mykolaiv, Ukraine, September 26 – 29, 2016, P.28.
12. Konovalenko, A. A., Stepkin, S. V., and **Vasilkovskiy, E. V.**, “Low-frequency radio recombination lines investigations”, *2016 International Young Scientists Forum on*

- Applied Physics and Engineering (YSF), **IEEE Conference Publications**, p. 218 – 221, DOI: 10.1109/YSF.2016.7753841 (2016).
13. Konovalenko, A., Zarka, P., Rucker, H. O., Zakharenko, V., Ulyanov, O., Sidorchuk, M., Stepkin, S., Melnik, V., Kalinichenko, N., Stanislavsky, A., Tokarsky, P., Koliadin, V., Shepelev, V., Dorovskyy, V., Bubnov, I., Yerin, S., Reznichenko, A., Litvinenko, G., Shevshuk, N., Koval, A., Vasylieva, I., Mylostna, K., Skoryk, A., Shevtsova, A., Volvach, Y, **Vasytkovsky, E.**, Ryabov, V., Lecacheux, A., Denis, L., Panchenko, M., Fischer, G., Imai, M., Griebmeier, J.-M., Mann, G., Litvinenko, O., Brazhenko, A., Vashchishin, R., Frantsuzenko, A., Koshovy, V., Lozinsky, A., Ivantyshin, O., “Multi-antenna observations in the low-frequency radio astronomy for the Solar System objects and related topics studies”, Abstracts of the 8th International Workshop on Planetary, Planetary and Heliospheric Radio Emission (PRE VIII), Seggau near Graz, Austria, October 25 – 27, 2016, P. 47.
 14. Konovalenko, A., Zarka, P., Rucker, H. O., Zakharenko, V., Ulyanov, O., Sidorchuk, M., Stepkin, S., Melnik, V., Kalinichenko, N., Stanislavsky, A., Tokarsky, P., Koliadin, V., Shepelev, V., Dorovskyy, V., Bubnov, I., Yerin, S., Reznichenko, A., Litvinenko, G., Koval, A., Shevshuk, N., Vasylieva, I., Mylostna, K., Skoryk, A., Shevtsova, A., Volvach, Y., **Vasytkovsky, E.**, Ryabov, V., Lecacheux, A., Denis, L., Panchenko, M., Fischer, G., Imai, M., Griebmeier, J.-M., Mann, G., Litvinenko, O., Brazhenko, A., Vashchishin, R., Frantsuzenko, A., Koshovy, V., Lozinsky, A., Ivantyshin, O., “Solar System Low-Frequency Radio Emission Studies with the UTR-2, URAN and GURT Radiotelescopes”, 32nd International Union of Radio Science General Assembly & Scientific Symposium (URSI GASS 2017), Montreal, Canada, August 19 – 26, 2017, Proceedings, [http://www.ursi.org/proceedings/procGA17/papers/Paper_HJ24P-3\(1320\).pdf](http://www.ursi.org/proceedings/procGA17/papers/Paper_HJ24P-3(1320).pdf).
 15. **Vasytkivskyi, Y. V.**, Stepkin, S. V., Konovalenko, A. A., “New objects and methods of the low-frequency radio spectroscopy using decametric radio recombination lines”, Abstracts of 25th Open Young Scientists’ Conference on Astronomy and Space Physics, Kyiv, Ukraine, April 23 – 28, 2018, P. 35.
 16. Stepkin, S. V., **Vasytkivskyi, Y. V.**, Konovalenko, A. A., “The most low-frequency spectral lines detected in the interstellar medium by radio astronomical methods”, Book of Abstracts, 18th Gamow Conference-School: “Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology, Cosmomicrophysics, Astroparticle Physics, Radioastronomy and Astrobiology”, Odesa, Ukraine, August 12 – 18, 2018, P.36.
 17. **Vasytkivskyi, Y. V.**, Stepkin, S. V., Konovalenko, A. A., “Low-frequency carbon radio recombination lines. New results”, Book of Abstracts, 9th Scientific Conference “Selected Issues of astronomy and astrophysics”, Lviv, Ukraine, October 1 – 5, 2018, P. 48.
 18. **Vasytkivskyi, Y. V.**, Stepkin, S. V., Konovalenko, A. A., “Detection of extremely high excited states of the interstellar Rydberg carbon atoms”, Abstracts of 26th Open Young Scientists’ Conference on Astronomy and Space Physics, Kyiv, Ukraine, April 22 – 27, 2019, P. 28.
 19. Konovalenko, O. O., Stepkin, S. V., **Vasytkivskyi, Y. V.**, “Spectroscopy of the interstellar medium with low-frequency carbon radio recombination lines”, Book of

- Abstracts (in Ukrainian), International Conference of Young Scientists and Post-Graduates at Institute of Electron Physics of NAS of Ukraine, Uzhhorod, Ukraine, May 21 – 24, 2019, P. 150 – 151.
20. Stepkin, S. V., Konovalenko, A. A., **Vasylykivskiy, Y. V.**, “Decameter Carbon Radio Recombination Lines Toward Cygnus A”, European Week of Astronomy and Space Science (EWASS 2019), Interactive program, <http://ewass.kuoni-congress.info/2019/programme/#!/papers>.
 21. **Vasylykivskiy, Y. V.**, Konovalenko, A. A., Stepkin, S. V., “High precision diffuse interstellar medium radio spectroscopy through low-frequency carbon radio recombination lines”, Abstracts of 27th Open Young Scientists’ Conference on Astronomy and Space Physics, Kyiv, Ukraine, April 26 – 30, 2021, P. 32.
 22. **Vasylykivskiy, Y. V.**, Konovalenko, O. O., Stepkin, S. V., “Spectroscopy of the interstellar medium with low-frequency carbon radio recombination lines. Large-scale survey of Galaxy at UTR-2 radio telescope”, Book of Abstracts (in Ukrainian), International Conference of Young Scientists and Post-Graduates at Institute of Electron Physics of NAS of Ukraine, Uzhhorod, Ukraine, May 26 – 28, 2021, P. 144 – 145.
 23. **Vasylykivskiy, Y. V.**, “Diffuse interstellar medium probing by decameter carbon radio recombination lines”, European Astronomical Society Annual Meeting (EAS 2021), Interactive program, <https://eas.unige.ch/EAS2021/program.jsp>.
 24. **Vasylykivskiy, Y.**, Konovalenko, A., Stepkin, S., “High-latitude Galactic regions studies using decameter carbon radio recombination lines”, 50th YERAC (Young European Radio Astronomers Conference, Interactive program, <https://www.iram-institute.org/EN/content-page-442-7-67-422-442-0.html>.
 25. **Vasylykivskiy, Y. V.**, Konovalenko, O. O., Stepkin, S. V., “Broadband studies of decameter carbon radio recombination lines in medium lying toward Cygnus A and Perseus A radio galaxies”, IEEE UkrMW-2022, 2nd Ukrainian Microwave Week, Interactive program, <https://easychair.org/smart-program/IEEEUkrMW-2022>.
 26. **Vasylykivskiy, Y. V.**, Konovalenko, O. O., Stepkin, S. V., “Large-scale studies of decameter carbon radio recombination lines in galaxy”, Book of Abstracts, 23th Gamow Conference-School: “Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology and Gravitation, Astroparticle Physics, Radioastronomy, Astrobiology and Genetics”, Odesa, Ukraine, August 21 – 25, 2023, P.37.

СПИСОК ЦИТОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

27. Konovalenko, A. A. and Stepkin, S. V., “Radio recombination lines”, in EAS Publications Series, 2005, vol. 15, pp. 271–295. doi:10.1051/eas:2005158.
28. Stepkin, S. V., Konovalenko, A. A., Kantharia, N. G., and Udaya Shankar, N., “Radio recombination lines from the largest bound atoms in space”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, vol. 374, no. 3, pp. 852–856, 2007. doi:10.1111/j.1365-2966.2006.11190.x.

29. Erickson, W. C., McConnell, D., and Anantharamaiah, K. R., “Low-Frequency Carbon Recombination Lines in the Central Regions of the Galaxy”, *The Astrophysical Journal*, vol. 454, p. 125, 1995. doi:10.1086/176471.
30. Kantharia, N. G. and Anantharamaiah, K. R., “Carbon recombination lines from the Galactic plane at 34.5 & 328 MHz”, *Journal of Astrophysics and Astronomy*, vol. 22, no. 1, pp. 51–80, 2001. doi:10.1007/BF02933590.
31. Anantharamaiah, K. R., “A survey of radio recombination line emission from the galactic plane at 325 MHz.”, *Journal of Astrophysics and Astronomy*, vol. 6, pp. 177–201, 1985. doi:10.1007/BF02715005.
32. Roshi, D. A., Kantharia, N. G., and Anantharamaiah, K. R., “Carbon recombination lines near 327 MHz. I. “Diffuse” CII regions in the Galactic Disk”, *Astronomy and Astrophysics*, vol. 391, pp. 1097–1113, 2002. doi:10.1051/0004-6361:20020899.
33. Konovalenko, A. A., Stepinkin, S. V., and Mukha, D. V., “Detection Of Carbon Recombination Lines In The Direction Of Galactic Plane At Decametric Wavelengths”, *Long Wavelength Astrophysics*, 26th meeting of IAU, vol. 26, 2006.
34. Konovalenko, A. et al., “The modern radio astronomy network in Ukraine: UTR-2, URAN and GURT”, *Experimental Astronomy*, vol. 42, no. 1, pp. 11–48, 2016. doi:10.1007/s10686-016-9498-x.
35. Ryabov, V. B. 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”, *Astronomy and Astrophysics*, vol. 510, 2010. doi:10.1051/0004-6361/200913335.
36. Konovalenko, A. A. et al., “Astrophysical Studies with Small Low-Frequency Radio Telescopes of New Generation”, *Radio Physics and Radio Astronomy*, vol. 21, p. 83, 2016. doi:10.15407/rpra21.02.083.
37. Kalberla, P. M. W. et al., “The Leiden/Argentine/Bonn (LAB) Survey of Galactic H I. Final data release of the combined LDS and IAR surveys with improved stray-radiation corrections”, *Astronomy and Astrophysics*, vol. 440, no. 2, pp. 775–782, 2005. doi:10.1051/0004-6361:20041864.
38. Knapp, G. R., Brown, R. L., Kuiper, T. B. H., and Kakar, R. K., “Carbon recombination line observations of the Sharpless 140 region.”, *The Astrophysical Journal*, vol. 204, pp. 781–788, 1976. doi:10.1086/154225.
39. Knee, L. B. G. and Brunt, C. M., “A massive cloud of cold atomic hydrogen in the outer Galaxy”, *Nature*, vol. 412, no. 6844, pp. 308–310, 2001.
40. Bennett, C. L. et al., “Morphology of the Interstellar Cooling Lines Detected by COBE”, *The Astrophysical Journal*, vol. 434, p. 587, 1994. doi:10.1086/174761.

АНОТАЦІЯ

Васильківський Є. В. Великомасштабний розподіл іонізованого вуглецю в Галактиці. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.03.02 – Астрофізика, радіоастрономія (10 – Природничі

науки, 104 – Фізика та астрономія). – Радіоастрономічний інститут НАН України, Харків; Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ, 2023.

Робота присвячена дослідженням низькочастотних рекомбінаційних радіоліній (РРЛ) вуглецю на радіотелескопі УТР-2 з метою визначення просторового розподілу областей С II в Галактиці. Проведено довготривалі оглядові спостереження в просторових об'ємах, що в десятки разів перевершують об'єми усіх попередніх досліджень низькочастотних РРЛ вуглецю. У якості реєстраторів були використані широкосмугові цифрові спектроаналізатори DSP-Z.

Низькочастотні РРЛ вуглецю були зареєстровані як поблизу галактичної площини ($|b| = 0^\circ - 5^\circ$), так і далеко за її межами ($|b| = 5^\circ - 30^\circ$). Зареєстровані лінії мали відносні інтенсивності порядку $10^{-4} - 10^{-5}$ від рівня континууму, ширина ліній складала 4 – 7 кГц (50 – 100 км/с). У рамках визначення просторової асоціації областей С II, що відповідають за спостережувані РРЛ, із іншими компонентами міжзоряного середовища, були порівняні спостережені характеристики зареєстрованих ліній з характеристиками та просторовим розподілом хмар нейтрального гідрогену HI у Галактиці. Отримано добре узгодження за інтенсивностями, ширинами та радіальними швидкостями для обох типів ліній. Визначено, що області формування обох типів ліній мають температури 50 – 100 К, електронні густини $\leq 0.01 \text{ см}^{-3}$, об'ємну густину гідрогену $\leq 35 \text{ см}^{-3}$, розміри хмар уздовж променя зору 5 – 10 пк.

Ключові слова: великомасштабний розподіл, електронна густина, електронна температура, інтегральна інтенсивність лінії, міжзоряний вуглець, міжзоряне середовище, нейтральний гідроген, радіоспектроскопія, радіотелескоп УТР-2, рекомбінаційні радіолінії, холодний газ, цифровий автокорелометр, цифровий спектроаналізатор, ширина лінії.

ANNOTATION

Vasylykivskiy Y. V. Large-scale distribution of ionized carbon in Galaxy. – Qualification scientific work on the rights of manuscript.

Candidate's thesis in Physics and Mathematics, speciality 01.03.02 – Astrophysics, radio astronomy (10 – Natural sciences, 104 – Physics and astronomy). – Institute of Radio Astronomy of the NAS of Ukraine, Kharkiv; Main Astronomical Observatory of the NAS of Ukraine, Kyiv, 2023.

This thesis is devoted to experimental studies of low-frequency carbon radio recombination lines (RRLs) in Galaxy at UTR-2 radio telescope in order to determine the spatial distribution of these lines forming regions (C II regions). Detected for the first time more than 45 years ago, low-frequency RRLs have proven themselves as a highly sensitive tool for diagnosing the cold, rarefied interstellar medium (ISM) that lies away from powerful stars. By using the RRLs observational line characteristics – line intensity and line width – it is possible to determine with high accuracy the physical conditions in C II regions – electron temperature, electron density, emission measure, C II regions dimensions and other important parameters.

Due to the relatively low ionization potential of interstellar carbon (11.4 eV) and its relatively high abundance ($C/H \sim 3 \cdot 10^{-4}$), this element in ionized state is presented in large numbers of ISM components. Ionization of carbon is ensured by ultraviolet photons with wavelengths of $91.2 \text{ nm} < \lambda < 110 \text{ nm}$, and carbon may be ionized in regions where the most abundant element – the hydrogen – remains in neutral state. Ionized carbon plays an important role in the physical and chemical gas phase processes in ISM.

For the purposes of this thesis, a technique of highly sensitive, broadband surveyed radio spectroscopic observations was developed. With this technique, the five-beam beam of UTR-2 radio telescope was set to zenith position by meridian, and due to the diurnal Earth rotation, the celestial sphere was scanned relative to the chosen inclination band with an approximately 2.5° width. Thus, during the twenty-four hours, the beam covered the entire celestial sphere with right ascensions from 0^{h} to 24^{h} , crossing the Galactic plane twice and covering the high-latitude regions of Galaxy, in which the search for low-frequency RRLs had never been conducted before. As part of this work, long-term (more than thousand hours) surveyed radio spectroscopic ISM studies were carried out in spatial volumes that are ten times greater than the volumes of all previous studies of low-frequency carbon RRLs – both within the Galactic plane and far beyond it. DSP-Z digital spectral analyzers with an analysis bandwidth of 24 MHz (from 8 to 33 MHz) and a large dynamic range (about 90 dB) were used as recorders during the observations.

Low-frequency carbon RRLs were detected both near the Galactic plane ($|b| = 0^\circ - 5^\circ$) and far beyond it ($|b| = 5^\circ - 30^\circ$). Detected lines had relative intensities of the order of $10^{-4} - 10^{-5}$ against continuum level, the line widths were 4 – 7 kHz (50 – 100 km/s). As part of determining the spatial association of the C II regions responsible for observed RRLs, the observational characteristics of detected lines were compared with characteristics and spatial distribution of neutral hydrogen H I clouds in Galaxy. Good agreement was obtained for the intensities, line widths, and radial velocities for both types of lines.

The association of C II regions with H I clouds provides a unique opportunity to unambiguously find out the physical parameters of diffuse clouds responsible for carbon RRLs and H I line formation. In this case, to one equation relating the parameters of H I line with temperature, density, and cloud size, two more are added that describe the carbon RRLs intensity and line width. It was determined that the temperature of such clouds lying in the range of 50 – 100 K, the electron density is $\leq 0.01 \text{ cm}^{-3}$, the hydrogen volume density is $\leq 35 \text{ cm}^{-3}$, the clouds sizes along the line of sight are 5 – 10 pc.

Thus, in this thesis the evidence of presence of large ionized gas volumes far beyond the Galactic plane is provided. The large-scale distribution of ionized carbon in Galaxy has been clarified – the C II regions are associated with neutral hydrogen H I clouds and may be observed up to high galactic latitudes. The results of this thesis can be used in further studies of physical, chemical, kinematic, evolutionary and energetic properties of cold extended regions in Galactic ISM.

Key words: large-scale distribution, electron density, electron temperature, integral line intensity, interstellar carbon, interstellar medium, neutral hydrogen, radio spectroscopy, UTR-2 radio telescope, radio recombination lines, cold gas, digital auto correlometer, digital spectral analyzer, line width.