

Радіоастрономічний інститут  
Національної академії наук України  
Головна астрономічна обсерваторія  
Національної академії наук України

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**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

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук  
Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ Є. В. Васильківський

Науковий керівник:  
Коноваленко Олександр Олександрович  
доктор фізико-математичних наук,  
академік НАН України

**Київ – 2023**

## 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 експериментальним дослідженням низькочастотних рекомбінаційних радіоліній (РРЛ) вуглецю в Галактиці на радіотелескопі УТР-2 з метою визначення просторового розподілу областей формування цих ліній (областей С II). Низькочастотні РРЛ, що вперше були зареєстровані більше 45 років тому, зарекомендували себе в якості високочутливого засобу діагностики холодного, розрідженого міжзоряного середовища (МЗС), що лежить вдалині від потужних зір. За допомогою спостережних характеристик ліній – їх інтенсивності та ширини, – існує можливість визначення з високою точністю фізичних умов в областях С II – електронної температури, електронної густини, міри емісії, їхніх розмірів та інших важливих параметрів.

Внаслідок відносно низького потенціалу іонізації міжзоряного вуглецю (11.4 eV) та його відносно високої рясноти ( $C/H \sim 3 \cdot 10^{-4}$ ), цей елемент у іонізованому стані присутній в багатьох компонентах МЗС. Іонізація вуглецю забезпечується ультрафіолетовими фотонами із довжинами хвиль  $91.2 \text{ нм} < \lambda < 110 \text{ нм}$ , у тому числі й в областях, де найбільш рясний та поширений елемент – гідроген – залишається нейтральним. Іонізований вуглець відіграє важливу роль у фізико-хімічних процесах газової фази МЗС.

Для цілей роботи було розроблено методику високочутливих, широкосмугових оглядових радіоспектроскопічних спостережень. При цій методиці п'ятипроменева діаграма направленості (ДН) радіотелескопа УТР-2 встановлювалась у зенітне положення відносно меридіана, за рахунок добового обертання Землі відбувалось сканування ділянок небесної сфери відносно смуги

обраного схилення шириною приблизно  $2.5^\circ$ . Таким чином, за добу ДН охоплювала усю небесну сферу в діапазоні прямих піднесень від  $0^h$  до  $24^h$ , двічі перетинаючи при цьому галактичну площину й охоплюючи високоширотні ділянки Галактики, в яких пошук низькочастотних РРЛ ніколи до цього не проводився. У рамках виконання роботи були проведені довготривалі (більше тисячі годин) оглядові радіоспектроскопічні дослідження МЗС у просторових об'ємах, що в десятки разів перевершують об'єми усіх попередніх досліджень низькочастотних РРЛ вуглецю – як в межах галактичної площини, так і далеко за її межами. В якості реєстраторів при спостереженнях були використані цифрові спектроаналізатори DSP-Z, що мають смугу аналізу шириною 24 МГц (від 8 до 33 МГц) та великий динамічний діапазон (близько 90 дБ).

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, були порівняні спостережні характеристики зареєстрованих ліній з характеристиками та просторовим розподілом хмар нейтрального гідрогену Н I у Галактиці. Було отримано хороше узгодження за інтенсивностями, ширинами та радіальними швидкостями для обох типів ліній.

Асоціація областей С II з хмарами Н I дає унікальну можливість однозначного з'ясування фізичних параметрів дифузних хмар, відповідальних за формування РРЛ вуглецю і лінії Н I. У цьому випадку до одного рівняння, що пов'язує параметри лінії Н I з температурою, густиною та розміром хмари, додається ще два, які описують інтенсивність РРЛ вуглецю та її ширину. Визначено, що температура подібних хмар 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.

Таким чином, у роботі отримані докази наявності великих об'ємів іонізованого газу далеко за межами галактичної площини. З'ясовано

великомасштабний розподіл іонізованого вуглецю в Галактиці – області С II асоціюються із хмарами нейтрального гідрогену HI і можуть спостерігатись до високих галактичних широт. Результати дисертаційної роботи можуть бути використані при подальших дослідженнях фізичних, хімічних, кінематичних, еволюційних та енергетичних властивостей холодних протяжних областей у галактичному МЗС.

**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

**Vasykivskyi 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  $2.5^\circ$  width. Thus, during the twenty-four hours, the beam covered the entire celestial sphere with right ascensions from  $0^{\text{h}}$  to  $24^{\text{h}}$ ,

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.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

*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., **Vasytkivskiy, 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., **Vasytkovsky, 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., Koshovyy, 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., Dorovskyy, 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., Koshovyy, V. V., Ivantyshyn, C. L., Lozinsky, A. B., Kharchenko, B. S., Vasylieva, I. Y., Kravtsov, I. P., **Vasytkivskiy, 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., **Vasytkivskiy, 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. **Vasytkivskiy, 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., Dorovsky, 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. **Vasytkivskiy, 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., **Vasytkivskiy, 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. **Vasylykivskiy, 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. **Vasylykivskiy, 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., **Vasylykivskiy, 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. **Vasylykivskyi, 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. **Vasylykivskyi, Y.**, Konovalenko, A., Stepkin, S., “High-latitude Galactic regions studies using decameter carbon radio recombination lines”, 50<sup>th</sup> YERAC (Young European Radio Astronomers Conference, Interactive program, <https://www.iram-institute.org/EN/content-page-442-7-67-422-442-0.html>.
25. **Vasylykivskyi, 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, 2<sup>nd</sup> Ukrainian Microwave Week, Interactive program, <https://easychair.org/smart-program/IEEEUkrMW-2022>.
26. **Vasylykivskyi, 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.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ .....	17
ВСТУП.....	18
РОЗДІЛ 1. ДОСЛІДЖЕННЯ ДИФУЗНОГО МІЖЗОРЯНОГО СЕРЕДОВИЩА ЗА ДОПОМОГОЮ НИЗЬКОЧАСТОТНИХ РЕКОМБІНАЦІЙНИХ РАДІОЛІНІЙ ВУГЛЕЦЮ.....	27
1.1. Фізика міжзоряного середовища та роль іонізованого вуглецю.....	27
1.2. Спектральні лінії у радіодіапазоні. РРЛ та їх параметри.....	35
1.3. Основні результати досліджень РРЛ на низьких частотах.....	45
1.4. Великомасштабна структура іонізованого газу в Галактиці. Перспективи подальших досліджень.....	50
1.5. Висновки по розділу 1.....	55
РОЗДІЛ 2. АНТЕНИ ТА АПАРАТУРА ДЛЯ НИЗЬКОЧАСТОТНОЇ РАДІОСПЕКТРОСКОПІЇ.....	57
2.1. Радіотелескоп УТР-2 як найбільш ефективний інструмент для досліджень низькочастотних РРЛ.....	57
2.2. Прилади для радіоастрономічної спектроскопії.....	61
2.3. Широкосмугові цифрові спектральні процесори .....	67
2.4. Програмне забезпечення для обробки отриманих радіоспектроскопічних даних .....	78
2.5. Методи радіоспектроскопії на УТР-2.....	88
2.6. Висновки по розділу 2.....	94
РОЗДІЛ 3. РАДІОСПЕКТРОСКОПІЯ ОБРАНИХ ОБ'ЄКТІВ ГАЛАКТИКИ В НИЗЬКОЧАСТОТНИХ РЕКОМБІНАЦІЙНИХ РАДІОЛІНІЯХ ВУГЛЕЦЮ.....	96
3.1. Моделі міжзоряних об'єктів з іонізованим вуглецем на прикладі середовища у напрямку Cas A, вибір об'єктів спостережень.....	96

3.2. Ширококутові високочутливі спостереження низькочастотних РРЛ вуглецю в напрямку Cas A на радіотелескопі УТР-2 за допомогою цифрових спектроаналізаторів DSP-Z.....	101
3.3. Спостереження низькочастотних РРЛ вуглецю в напрямку емісійної туманності S140 та гігантської оболонки нейтрального водню GSH 139-03-69 на радіотелескопі УТР-2 за допомогою ЦК .....	106
3.4. З'ясування фізичних параметрів об'єктів за даними РРЛ та порівняння моделей на високих і на низьких частотах .....	120
3.5. Висновки по розділу 3.....	128
<b>РОЗДІЛ 4. МЕТОДИ ДІАГНОСТИКИ МІЖЗОРЯНОГО СЕРЕДОВИЩА ЗА ДОПОМОГОЮ НИЗЬКОЧАСТОТНИХ РЕКОМБІНАЦІЙНИХ РАДІОЛІНІЙ ВУГЛЕЦЮ.....</b>	<b>129</b>
4.1. Актуальність повного огляду неба в низькочастотних РРЛ вуглецю.....	129
4.2. Розрахунок необхідних параметрів експериментів.....	133
4.3. Обґрунтування стратегії огляду .....	136
4.4. Розробка алгоритму огляду .....	148
4.5. Висновки по розділу 4 .....	151
<b>РОЗДІЛ 5. ОГЛЯД ДІЛЯНОК ГАЛАКТИКИ В РЕЖИМІ ВЕЛИКОМАСШТАБНОГО ВИВЧЕННЯ РОЗПОДІЛУ ІОНІЗОВАНОГО ВУГЛЕЦЮ .....</b>	<b>153</b>
5.1. Реалізація обраної методології спостережень та апробація спостережної концепції «десять в одному».....	153
5.2. Спостереження близенітної ділянки Північного неба .....	166
5.3. Вивчення довготного та широтного розподілу характеристик РРЛ вуглецю та лінії нейтрального водню H I .....	181
5.4. Астрофізичний аналіз отриманих даних .....	188
5.5. Висновки по розділу 5 .....	193

ВИСНОВКИ .....	194
ПОДЯКИ .....	196
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	197
ДОДАТОК А.....	215



## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АЦП	Аналогово-цифровий перетворювач
ГУРТ	Гігантський український радіотелескоп
ІЧ	Інфрачервоне випромінювання
ЛТР	Локальна термодинамічна рівновага
МЗС	Міжзоряне середовище
ОФД	Область фотодиссоціації
РРЛ	Рекомбінаційні радіолінії
УРАН	Український радіоінтерферометр Академії наук
УТР-2	Український Т-подібний радіотелескоп, друга модель
УФ	Ультрафіолетове випромінювання
ЦК	Цифровий колерометр
CNM	Холодне нейтральне середовище
DSP	Digital Signal Processing
DSP-Z	Digital Spectro-Polarimeter, Z-type
С II	Іонізований вуглець
ELDWIM	Extended low-density war ionized medium
FFT	Fast Fourier Transform
Н I	Нейтральний гідроген
Н II	Іонізований гідроген
HIM	Гаряче іонізоване середовище
LAB	Огляд «Лейден – Аргентина – Бонн»
LOFAR	LOw-Frequency ARray
NenuFAR	New Extention in Nancay Upgrading LOFAR
ORT	Ooty Radio Telescope
WIM	Тепле іонізоване середовище
WNM	Тепле нейтральне середовище

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Міжзоряне середовище (МЗС) є нерівноважною, багатокомпонентною, системою з безперервним обміном масою, енергією та імпульсом. Основною складовою МЗС є її газовий компонент, 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. Одним 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 світових 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 Н I, які широкорозповсюджені як у межах галактичної площини, так і на великих висотах над площиною (до 500 пк). Здебільшого в низькочастотних РРЛ вивчалися 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 широкосмугових, 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 I 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 I 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 I, де вуглець частково або повністю іонізований ультрафіолетовими фотонами з довжинами хвиль  $91.2 \text{ нм} < \lambda < 110 \text{ нм}$ .

**Особистий внесок здобувача<sup>1</sup>.** 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 I.

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

---

<sup>1</sup> Посилання згідно переліку поданого після анотації та в Додатку А

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 матеріалів 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;
- IX 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-та 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<sup>2</sup>.** 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 зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, додатку. Загальний обсяг роботи складає 222 сторінки, основного тексту – 155 сторінок. Вона містить 66 рисунків, 8 таблиць та список використаних джерел із 160 найменуваннями на 18 сторінках.

---

<sup>2</sup> Посилання згідно переліку поданого після анотації та в Додатку А

# РОЗДІЛ 1

## ДОСЛІДЖЕННЯ ДИФУЗНОГО МІЖЗОРЯНОГО СЕРЕДОВИЩА ЗА ДОПОМОГОЮ НИЗЬКОЧАСТОТНИХ РЕКОМБІНАЦІЙНИХ РАДІОЛІНІЙ ВУГЛЕЦЮ

### 1.1. Фізика міжзоряного середовища та роль іонізованого вуглецю

Міжзоряне середовище (МЗС) є ключовим об'єктом при вивченні фізики космосу. Попри те, що його маса складає лише 3% від загальної маси Галактики ( $1.5 \times 10^{11} M_{\odot}$ ), роль МЗС у процесі галактичної еволюції у край велика. МЗС пов'язане із зоряним матеріалом упродовж усього циклу життя зорь. Зорі виникають у щільних областях МЗС, далі вони після життєвого циклу можуть вибухнути у вигляді наднових і, скинувши оболонку, повертають у вигляді зоряного вітру в МЗС продукти нуклеосинтезу, збагачені важкими елементами. Постійно відбувається обмін енергією і речовиною між різними компонентами МЗС, між МЗС і зорями та іншими об'єктами Галактики.

МЗС є нерівноважною багатоконпонентною системою з безперервним обміном масою, енергією та імпульсом між компонентами. У світлі цього, МЗС може слугувати лабораторією для вивчення систем, далеких від термодинамічної рівноваги. До компонентів МЗС відносять газовий компонент (який, у свою чергу, також є багатофазним), космічні промені, що пронизують увесь об'єм МЗС, електромагнітне випромінювання самої різної природи, і магнітне поле, жорстко пов'язане з газовим компонентом практично на всіх масштабах. Характерною особливістю МЗС і його багатоконпонентності є співіснування усіх цих компонентів у кожному елементі об'єму.

МЗС багато в чому визначає основні властивості галактик. Міжзоряний газ несе в собі інформацію про усі найбільш значимі події, що відбуваються в галактиках в процесі еволюції.

Основну масу міжзоряного газу займає гідроген – близько 70% (як і в середньому в космічних умовах); гелій займає приблизно 28%, кисень 0.6% і

вуглець 0.3%. МЗС у край неоднорідне, 95% його об'єму складають відносно щільні молекулярні й атомарні хмари. Простір між ними й іншими об'єктами Галактики заповнює теплий і гарячий дифузний газ. Оскільки гідроген – найбільш рясніший елемент, то компоненти МЗС можна класифікувати за переважаючою в них формою гідрогену. Значна частина міжзоряного гідрогену знаходиться у формі переважно нейтрального газу (у якому доля іонізованого гідрогену складає декілька відсотків). Цю фазу називають газом Н І. Газ Н І займає практично весь об'єм диска Галактики, в деяких галактиках його видно далеко за межами оптичного диска. В останні десятиліття стало зрозумілим, що товщина диска Н І в галактиках може складати декілька сотень парсек. Газ Н І негомогенний. Він представлений двома фазами – дифузного міжхмарного газу і хмарного компонента (який також називається дифузними хмарами Н І). У Галактиці густина міжхмарного гідрогену  $n_{intercloud} \sim 0.3 \text{ см}^{-3}$ ,  $T_{intercloud} \sim 10^4 \text{ К}$ , густина газу в дифузних хмарах  $n_{cloud} \sim 30 \text{ см}^{-3}$ ,  $T_{cloud} \sim 100 \text{ К}$ . Таким чином, між міжхмарним газом і газом у формі дифузних хмар існує приблизна динамічна рівновага, оскільки їх тиски рівні,  $n_{intercloud} T_{intercloud} \sim n_{cloud} T_{cloud}$ .

Під іонізованим гідрогеном розуміють газ, повністю іонізований ультрафіолетовим (УФ) випромінюванням лаймановського континууму, тобто випромінюванням з довжиною хвилі  $\lambda < 91.2 \text{ нм}$ . Особливістю цього стану газу є його локалізація переважно в околі молодих гарячих зір класів О і В, в спектрах яких досить багато квантів лаймановського континууму. Він формує так звані зони Н II (також їх називають зонами Стрьомгрена) навколо молодих гарячих зорь. Важливим є той факт, що якщо таку зорю оточити досить протяжною областю гідрогену, то буде сформована область Н II кінцевого розміру, така, що практично усі кванти лаймановського континууму затримуватимуться в цій області, а назовні вийде лише мала їх частина. Температура газу в області Н II завжди близька до  $10^4 \text{ К}$ , густина знаходиться в межах  $1 - 4 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ , і тиск може відповідно досягати дуже високих значень, близько  $10^8 \text{ К} \cdot \text{см}^{-3}$ . Тому зони Н II нестационарні і розширюються з надзвуковою швидкістю. Газ Н II в околі молодих зір не можна назвати окремою фазою МЗС – він не знаходиться в

динамічній рівновазі з іншими фазами, його тиск визначається випадковими чинниками, які призвели до того або іншого значення густини газу в околі зорі; його існування повністю залежить від центральної зорі. Проте в пізніші роки точка зору на газ Н II змінилася. Було виявлено існування протяжних дифузних областей Н II, просторово не пов'язаних з молодими масивними зорями. Як і нейтральний гідроген, газ Н II тягнеться на досить велику висоту над площиною тієї або іншої галактики, аж до 1 – 2 кпк. Власне, завдяки цій обставині дифузний газ Н II і був виявлений – в площині галактик його важко виділити на тлі дуже яскравих областей Н II в околі молодих зір, тобто на тлі «класичних» зон Н II. Вочевидь, походження дифузного газу Н II пов'язане з наявністю в МЗС квантів лаймановського континууму, що виявилися здатними покинути зони Н II (наприклад, із-за нерегулярного розподілу густини в межах туманностей молодих зірок).

Молекулярні хмари займають порівняно невеликий об'єм МЗС (близько 2% від усього об'єму диска Галактики), проте в них зосереджена велика частина маси МЗС (більше 50%). Більше того, саме з молекулярного газу утворюються зорі; іншими словами, саме молекулярний газ зв'язує газову і зоряну складові Галактики (а також її нетепловий компонент – космічні промені і жорстке випромінювання) в єдину взаємодіючу систему. Проте, вони цікаві не лише цим, але і фізичними процесами, що визначають їх фізичні властивості. Порівняно недавно стало зрозуміло, що молекулярні хмари у край неоднорідні. Ранні спостереження молекулярних хмар мали низьку кутову роздільну здатність, тому хмари були видні як деякий цілісний гомогенний об'єкт з досить високою густиною (середня густина близько  $100 \text{ см}^{-3}$ ). Проте, більш пізніші спостереження показали, що молекулярні хмари за своєю структурою нагадують вату, тобто усередині них існують щільні конденсації («клампи»), занурені в менш щільний газ. Власне, молекулярний газ в молекулярних хмарах заповнює усього близько 20% об'єму усієї молекулярної хмари, інший об'єм зайнятий дифузним газом. Молекулярні хмари можуть мати температури 10 – 20 К і густину аж до  $10^3 - 10^6 \text{ см}^{-3}$ . Тиск в таких хмарах через гравітацію значно перевершує тиск в

оточучому дифузному МЗС. Молекулярні хмари існують обмежений час, близько 100 млн років, після чого руйнуються енерговиділенням від зорь, що народжуються в них, і перетворюються на ОВ-асоціації. Цей процес квазістаціонарно підтримується у Галактиці (на часових масштабах в декілька оборотів Галактики). Повне число велетенських молекулярних хмар в Галактиці складає близько 2500, що близько до числа ОВ-асоціацій. Враховуючи, що час життя ОВ-асоціацій має такий же порядок, що і час життя молекулярних хмар, можна зрозуміти, що приблизна рівність числа і тих, і інших є свідченням квазістаціонарності процесу перетворення газу в зорі та їх генетичний зв'язок.

Багатофазний газ, що заповнює велику частину Галактики, спостерігається при середньому тиску  $\sim 4000 \text{ K} \cdot \text{cm}^{-3}$  [1]. Теоретичне обґрунтування існування багатофазного МЗС було уперше забезпечене Філдом, Голдсмітом і Гебінгом [2]. Вони показали, що температурна залежність швидкості охолодження міжзоряного газу така, що холодні ( $T \sim 10^2 \text{ K}$ ), нейтральні (H I) хмари можуть співіснувати при рівновазі по тиску з гарячим ( $T \sim 10^4 \text{ K}$ ) міжхмарним газом H I в обмеженому діапазоні тисків, близькому до тиску, спостережуваному в МЗС. У їх моделі нагрівання забезпечувалося головним чином низькоенергічними космічними променями, а охолодження шляхом зіштовхувального збудження гідрогена і гелія при високих температурах і атомів, подібних  $\text{C}^+$  при низьких температурах. У роботі [2] також було висловлене припущення, що можливе існування й третьої стабільної фази з температурою вище  $10^6 \text{ K}$ , в якій гальмівне випромінювання («bremstrahlung») є основним охолоджувальним процесом. У роботі [3] є припущення, що вибухи наднових зорь в Галактиці можуть робити гарячі «тунелі» в МЗС з коефіцієнтом заповнення близько 10%. Вимірювання, виконані на супутнику «Коперник» упродовж 1970 – 1980-х рр. з використанням УФ-ліній поглинання атомарного і молекулярного гідрогену, що спостерігався в зоряних спектрах, показали, що об'ємна густина гідрогену в МЗС варіюється на два порядки величини. Ці спостереження підкреслили клячкватість («кламповість») міжзоряного газу, який розглядався в моделях МЗС. У 1977 році МакКі та Острайкер висунули трьохкомпонентну модель МЗС, регульовану вибухами

наднових зір у неоднорідному середовищі [1]. В їх моделі два компоненти з моделі [2] були занурені в третій компонент – середовище, чий коефіцієнт заповнення був набагато більшим, близько 70%, і він слугував фоновим середовищем для інших двох компонентів. Ці три компоненти заповнюють велику частину об'єму Галактики і знаходяться в грубій рівновазі по тиску. Хоча модель МакКі – Острайкера не може бути застосована до усього МЗС (вона не включає молекулярні хмари і області H II), вона забезпечує розумне пояснення різних компонентів МЗС:

1) Гаряче іонізоване середовище (hot interstellar medium або HIM): цей компонент з типовою температурою  $5 \cdot 10^6$  К і електронною густиною  $0.003 \text{ см}^{-3}$  має коефіцієнт заповнення 0.7 – 0.8 і відомий також як «корональний газ». Він спостерігається в м'якому рентгенівському випромінюванні і в УФ-лініях поглинання [O V], [N IV], [S III]. Вимірювання в УФ-діапазоні виконані за допомогою супутника «Коперник», була експериментально отримана інформація про цей компонент.

2) Холодне нейтральне середовище (cold neutral medium або CNM): холодні, нейтральні, відносно щільні хмари занурені в HIM. Коефіцієнт заповнення цих хмар в Галактиці складає 0.02 – 0.04, щільність атомів і температура близько  $20 - 50 \text{ см}^{-3}$  і 30 – 80 К відповідно. Ці хмари легко виявити при дослідженні поглинання газу H I, вони обмежені областями поблизу площини Галактики зі шкалою висот  $\sim 100$  пк. Ступінь іонізації цього газу точно невідомий [4]. Типові розміри хмар складають від декількох парсек до декількох десятків парсек.

3) Тепле нейтральне і тепле іонізоване середовище (warm neutral medium (WNM) і warm ionized medium (WIM)): навколо холодних нейтральних хмар є тепла фотоіонізована корона з температурою близько 8000 К і коефіцієнтом заповнення набагато більшим, ніж в CNM. Корона хмари розділена на дві області. У зовнішній області, відомій як WIM, іонізація часток забезпечується гарячими зірками (класу B). Цей компонент

спостерігається при вимірюваннях дифузних ліній  $H\alpha$  [5] і при вимірюваннях міри дисперсії пульсарів, його електронна густина складає близько  $0.25 \text{ см}^{-3}$ . Проте, коефіцієнт заповнення цього газу визначений не дуже добре, хоча середня електронна густина на промені зору відома і складає  $\sim 0.03 \text{ см}^{-3}$ . Внутрішній шар меншого об'єму відносно нейтральний і представлений WMN. Іонізація часток цього компонента невідома. WNM головним чином спостерігається в лінії H I в емісії, шкала висот газу обмежена сонячним циклом  $\sim 500$  пк [6]. Внаслідок високої спинові температури цей компонент не спостерігається у поглинанні.

Обмін матеріалом між різними вищенаведеними фазами внаслідок різних процесів, таких як випар хмар, фотоіонізація й інших, є досить швидким, і маса заданого елемента об'єму типово змінює фазу за часовий проміжок менше  $10^6$  років. Слід зазначити, що «корональний газ» спостерігається в м'якому рентгенівському діапазоні і в УФ-лініях багаторазово іонізованих атомів кисню, азоту, сірки й інших елементів. Нейтральний гідроген досліджується за допомогою лінії надтонкої структури H I 21 см. Тепле, частково іонізоване середовище досліджується за допомогою спектральних ліній і по дисперсії випромінювання пульсарів.

Відомо, що фотони від масивних зірок з енергіями вище 13.6 eV іонізують гідроген і утворюють області H II. Менш енергійні фотони з'єднуються з газом фотоелектронів від великих молекул і малими пиловими частками, які нагрівають атомарний газ в областях фотодиссоціації (ОФД) навколо областей H II і – у великих масштабах – в дифузних міжзоряних хмарах. Зорі за допомогою своїх вибухів і вітрів динамічно роздувають МЗС, нагрібаючи речовину і формуючи великі каверни. Це уприскування механічної енергії в МЗС є джерелом турбулентного тиску, що підтримує газовий диск і хмари в ньому відносно галактичної і самогравітації.

Внаслідок відносно низького першого потенціалу іонізації вуглецю (11.4 eV) і його відносно високої рясноти ( $C/H \sim 3 \cdot 10^{-4}$ ), багато компонентів МЗС містять цілком спостережувані об'єми одноразово іонізованого вуглецю (області



C II). Вуглець відіграє важливу роль в хімічних реакціях в газовій фазі і ефективно відтворює різні фізичні процеси в МЗС, більшість міжзоряних молекул містять атоми вуглецю. Вуглець може бути іонізованим фоновими УФ-фотонами. Області C II можуть бути вивчені за допомогою рекомбінаційних ліній вуглецю в радіодіапазоні (рекомбінаційні радіолінії (РРЛ)) і лінії тонкої структури [C II] 158 мк в інфрачервоному (ІЧ) діапазоні. Спостереження лінії [C II] 158 мк допомогли класифікувати іонізований вуглець як широкорозподілений газ у Галактиці [7 – 11]. Виходячи з результатів спостережень на супутнику COBE було висновлене припущення, що велика частина випромінювання [C II] у Галактиці утворюється в протяжному, низкощільному, теплому іонізованому середовищі (extended low-density warm ionized medium або ELDWIM). У роботі [10] також стверджувалося, що можливі місця формування лінії тонкої структури вуглецю в низхідному порядку важливості такі: ELDWIM → CNM → ОФД, що виникають на межі між іонізованим газом і молекулярними хмарами [12, 13]. Це підкреслює всюдишну, всепроникну природу одноразово іонізованого вуглецю; він пов'язаний і з нейтральним, і з іонізованим гідрогеном. Проте, не цілком зрозуміло – за яких фізичних умов утворюються виявлені РРЛ вуглецю. Теоретична основа для можливої кореляції між двома типами вуглецевих ліній походить від розуміння вкладу процесу диелектронної рекомбінації [14] у заселеності високозбуджених рівнів вуглецю за певних фізичних умов. Цей процес включає збудження переходу тонкої структури  ${}^2P_{1/2} \rightarrow {}^2P_{3/2}$  в одноразово іонізованому вуглеці, який при висвіченні фотона і призводить до випускання лінії [C II] 158 мк.

Майже 60 років тому вважалося, що велика частина електронів в околі гарячого МЗС продукується атомами вуглецю. Вуглець є найряснішим елементом ( $C/H = 3.7 \cdot 10^{-4}$ ) серед тих, які мають потенціал іонізації менше за гідрогенний ( $E_C = 11.2$  еВ,  $E_H = 13.6$  еВ). УФ-фотони з  $91.2 \text{ нм} < \lambda < 110 \text{ нм}$  від О і В-зорь вириваються з областей Н II і, поширюючись в середовищі, можуть практично повністю іонізувати вуглець. При охолодженні газу продукується емісійна лінія, що відповідає переходу тонкої структури іона вуглецю  ${}^2P_{3/2} \rightarrow {}^2P_{1/2}$  з

$\Delta E = 0.0079$  eV і  $\Delta T = 92$  K,  $\lambda = 158$  мк. Проте аналіз нагрівально-охолоджувальної рівноваги дає значення кінетичної температури  $T_K$  тільки  $\sim 15$  K. Це значно менше, ніж значення, отримане при спостереженнях, приміром, лінії Н І ( $T_K \sim 50 - 100$  K) [15].

Пізніше були припущені нові чинники, що призводять до нагрівання й іонізації холодних компонентів в МЗС. Серед них можна назвати космічні промені (1 – 2 MeV) і рентгенівські промені ( $\sim 10$  keV) [16]. Цей механізм може забезпечити електронну густину  $N_e \sim 0.002 - 0.05$  см<sup>-3</sup>. Атоми вуглецю залишаються головним елементом-охолоджувачем в цих моделях. При цьому очікувані інтенсивності відповідних РРЛ гідрогену ( $n = 200 - 400$ ) будуть відносно високими. Практично повна нейтральність гідрогену в холодних компонентах МЗС може слугувати можливим поясненням відсутності в них іонізованих атомів аж до недавніх пір. Більш ретельні дослідження допоможуть розв'язати цю проблему.

Очевидно, що процеси нагрівання середовища за межами областей Н ІІ дуже складні. Серед важливих чинників можна згадати фотоіонізацію, космічні і рентгенівські промені, фотоелектричне випромінювання малих часток, магнітні перез'єднання, дисипації турбулентності міжзоряних молекул і т. д. [17].

Області іонізованого вуглецю за межами гарячих областей можуть існувати в ОФД в комплексі з областями Н ІІ або в нейтральних компонентах МЗС (Н І або молекулярних). Тілленс і Холленбах [12] позначили ОФД як області, де нагрівання і/або хімічні властивості переважно нейтрального газу регулюється УФ-фотонами з  $E < 13.6$  eV.

Нейтральний та іонізований вуглець може спостерігатися декількома астрофізичними методами. Деякі з них приведені на рис. 1.1. Радіоастрономічні методи, зокрема спостереження РРЛ вуглецю, будуть одними з самих багатообіцяючих.

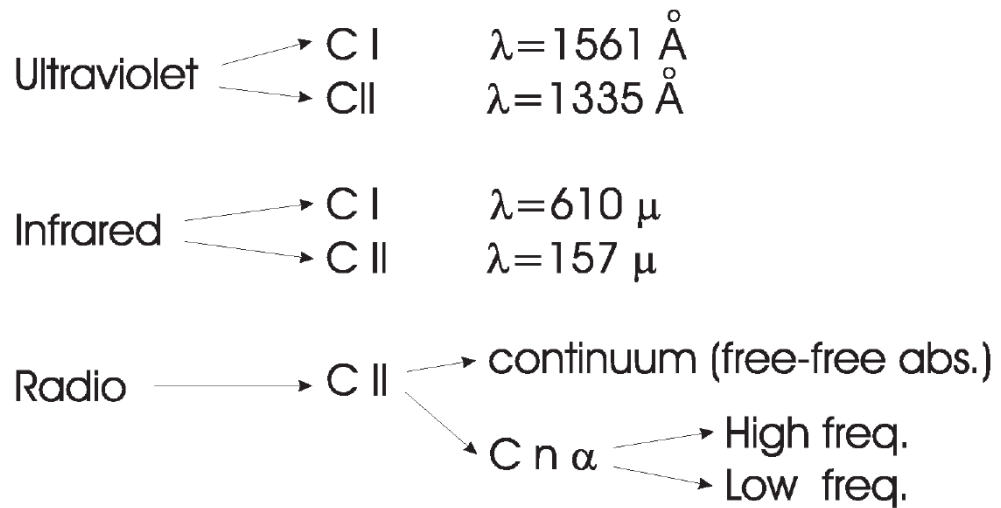


Рис. 1.1. Астрофізичні методи спостереження міжзоряного вуглецю. Рисунок взятий з роботи [17].

## 1.2. Спектральні лінії у радіодіапазоні. РРЛ та їх параметри

Спостереження спектральних ліній є ефективним засобом діагностики фізичних і хімічних умов в астрономічних об'єктах взагалі і в МЗС зокрема. За допомогою частот ліній можна ідентифікувати приналежність атома або молекули до того або іншого хімічного елементу, а за допомогою доплерівського зсуву частоти можна визначити радіальні швидкості руху речовини уздовж променя зору відносно спостерігача. Ширина ліній несе інформацію про теплові і турбулентні рухи в середовищі, де ці лінії були сформовані.

Температури, густини та хімічний склад областей Н II, затінених пилом щільних молекулярних хмар, а також дифузного міжзоряного газу якнайкраще визначаються за даними спектроскопічних спостережень в радіодіапазоні. Радіолінії мають цілий ряд переваг порівняно з оптичними лініями. Серед них можна виділити наступні:

- 1) Набагато ширший частотний діапазон їх спостережень, що дозволяє спостерігати джерела на значних відстанях, а також який дозволить реалізувати більш високе частотне розділення.

- 2) Ефективніша взаємодія речовини з випромінюванням, що дозволяє вивчати цілий ряд важливих явищ.
- 3) Радіолінії мають вкрай малу природну ширину, внаслідок чого можна з високою точністю виділяти навіть зовсім малі зміни в температурі газу і його радіальній швидкості.
- 4) У радіодіпазоні на низьких частотах  $h\nu \ll kT$ , відповідно, суттєвий внесок має стимульована емісія. Це призводить до того, що оптична товщина лінії змінюється за законом  $T^{-1}$ , що сприяє формуванню природних мазерів.
- 5) Прозорість пилу для радіохвиль в нашій та інших галактиках дозволяє вивчати спектральні лінії від пилових молекулярних хмар, протозірок і молекулярних дисків, що обертаються навколо активних ядер галактик [18].

Спектральні радіолінії, що представляють інтерес для радіоастрономії, можна загалом розділити на три основні типи: лінія нейтрального гідрогену Н I, міліметрові і сантиметрові молекулярні радіолінії, а також РРЛ в діапазоні від субміліметрових до декаметрових хвиль. Усі ці типи ліній були теоретично передбачені, а потім і виявлені саме в такому хронологічному порядку.

Перехід надтонкої структури основного стану гідрогену, що призводить до випромінювання лінії на довжині хвилі 21 см, був передбачений Ван де Хьюлстом у 1945 р. [19]. Ці лінії були послідовно виявлені практично одночасно двома групами: Юеном і Парселлом у 1951 р., Мюллером і Оортом (також у 1951 р.) [20, 21].

Можливість виявлення молекулярних ліній від міжзоряного простору уперше була висловлена І. С. Шкловським у 1949 р. [22]. Він запропонував можливість виявлення спектральних ліній внаслідок переходів між обертальними рівнями  $\Lambda$ -дублета основного стану ОН і СН. Вайнреб, Баррет, Мікс і Генрі в 1963 р. уперше виявили близьку пару ліній ОН в поглинанні [23]. Відтоді було виявлено безліч молекулярних ліній і їх дослідження стали важливою частиною радіоастрономії. Деякі з молекулярних ліній, такі як ОН,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{SiO}$ , дуже інтенсивні і можуть виникати внаслідок таких феноменів, як мазери [24, 25].

Можливість спостереження РРЛ гідрогену і гелію в радіодіапазоні від іонізованих областей в МЗС уперше припустив Н. С. Кардашев у 1959 р. [26], хоча до цього в 1945 р. Ван де Хюлст дійшов висновку, що такі лінії будуть неспостережуваними [19]. Уперше РРЛ гідрогену були виявлені Р. Л. Сороченко і Е. В. Бородзичем, а також А. Ф. Дравських і З. В. Дравських у 1964 р. в напрямку туманності Омега (перехід  $n_{91} \rightarrow n_{90}$  на 8.8 ГГц [27] і перехід  $n_{105} \rightarrow n_{104}$  на 5.7 ГГц [28] відповідно).

Наведені вище три типи спектральних ліній походять від трьох різних типів об'єктів в міжзоряному просторі. Лінія H I виникає в широкорозподіленому нейтральному гідрогені, який міститься у формі холодних хмар, а також гарячого міжхмарного середовища. Більша частина молекулярних ліній спостерігається від хмар, які в літературі називаються велетенськими молекулярними хмарами. Такі хмари або комплекси таких хмар імовірно є місцями інтенсивного зореутворення. Високочастотні РРЛ виникають в хмарах, які більш-менш повністю іонізовані молодими і гарячими зорями, зануреними в ці хмари (області H II).

Ці три наведені вище типи об'єктів відповідають, у певному розумінні, трьом стадіям еволюції міжзоряної матерії. Велетенські молекулярні хмари імовірно формуються внаслідок зіткнень і злиття хмар нейтрального гідрогену або внаслідок стискання міжзоряної матерії хвилею щільності, що проходить через Галактику. Зорі утворюються в комплексах таких хмар, а потім іонізують матерію навколо себе, що призводить до формування областей H II. Області H II врешті-решт стануть нейтральними хмарами після того, як тільки збуджуючі зорі усередині них вийдуть зі своєї гарячої фази і стануть нездатними підтримувати безперервну іонізацію. Зоря може, зрештою, вибухнути як наднова і викинути велику частину міжзоряної речовини, з якої вона була створена, назад в МЗС.

### *Теорія формування та фізика РРЛ*

Коли на нейтральне МЗС впливає зовнішнє поле випромінювання, що складається з фотонів достатньої енергії, це запускає процес іонізації елементів, що утворюють це середовище, а також і подальший, зворотний процес –

рекомбінацію. Іонізаційна рівновага встановлюється у випадку, коли швидкість іонізації середовища знаходиться у балансі зі швидкістю рекомбінації, наприклад, в областях II в Галактиці. У цих областях випромінювання від зорь підтримує іонізацію. РРЛ випромінюються, коли вільний електрон захоплюється на збуджений атомний рівень, від якого потім каскадує вниз, до основного стану, продукуючи емісійні лінії при кожному переході (рис. 1.2). Відносні заселеності атомних рівнів, що беруть участь в заданому переході, можуть бути зручно описані в термінах температури збудження  $T_{ex}$ , яка визначається за формулою Максвелла – Больцмана  $\frac{n_1}{n_2} = \frac{g_1}{g_2} \exp\left(-\frac{h\nu}{kT_{ex}}\right)$ . Тут  $n_1$  і  $n_2$  – дійсні числа, що відповідають квантовим рівням 1 і 2, які мають статистичні ваги  $g_1$  і  $g_2$ . У нерівноважних умовах, які часто мають місце у деяких областях МЗС, температура збудження є функцією квантового числа. Коли заселеності рівнів знаходяться в тепловій рівновазі з вільною плазмою – температура збудження наближається до кінетичної температури газу, яка визначається максвеллівським розподілом швидкостей електронів та іонів у межах хмари. Теплова рівновага очікується при високих квантових числах, де заселеності рівнів в основному визначаються зіткненнями. Каскадування електрона продукує фотони з енергіями в діапазоні від довгих радіохвиль ( $n > 500$ ) до УФ-хвиль (Лаймановські лінії,  $n \sim 1$ ). РРЛ, як бул осказано вище, охоплюють широкий діапазон електромагнітного спектру. Інтенсивності і ширина РРЛ є чутливими функціями фізичних умов, що мають місце в області їх формування, внаслідок чого РРЛ використовують як засіб діагностики іонізованого середовища.

На формування ліній на різних частотах, що відповідають переходам між різними квантовими числами, впливають різні фізичні процеси. РРЛ на високих частотах дуже чутливі до високощільних областей, тоді як на низьких частотах у них відстежуються низкощільні, холодніші області Галактики. Отже, вимірювання РРЛ в усіх діапазонах частот можуть бути використані для відстежування фізичних умов, існуючих в різних областях іонізованого середовища. При невеликих  $n$  випромінювальні процеси регулюють заселеності

рівнів і зміщують їх у бік нерівноважних значень. При цих значеннях  $n$  інвертовані заселеності (негативні температури збудження) одержуються в результаті відносно швидшого каскадування електрона до них від високих рівнів. Це відбувається внаслідок значень коефіцієнта Ейнштейна для спонтанної емісії  $A_{m,n}$ , які є суворою функцією від  $n$ ;  $A_{m,n} \propto \frac{1}{n^{5.5}}$ . Феномен інвертованих заселеностей породжує мазерне випромінювання за наявності фонового континууму. З іншого боку, при великих  $n$  атоми більші, зіткнення відчуваються частіше і сильніше, і вони термалізують ці рівні. Заселеності рівнів та інтенсивності ліній визначаються різними фізичними процесами. Відхилення від локальної термодинамічної рівноваги (ЛТР) є основним моментом у розумінні випромінювання лінії, що продукується при діапазоні фізичних умов, вони вивчаються і кількісно визначаються в порядку використання РРЛ в якості «зонда» умов у МЗС.

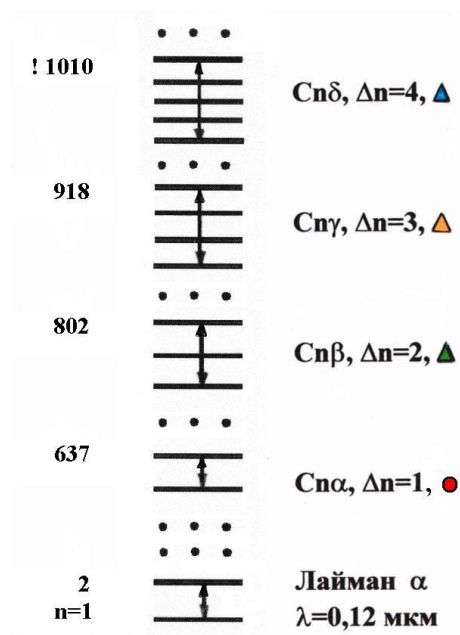


Рис. 1.2. Схематичне зображення атома, що став при рекомбінації електрона нейтральним у високозбудженому стані.

З моменту їх першого виявлення Сороченко і Бородзичем [27], а також А. Ф. Дравських і З. В. Дравських [28], спостереження РРЛ та їх інтерпретація стали важливим напрямом радіоастрономії. Ці лінії спостерігаються в широкому

діапазоні частот – від 86 ГГц [29] до 10 МГц [30], що відповідає переходам з головними квантовими числами від  $n = 42$  до  $n = 843$  відповідно. РРЛ позначаються як  $Xn\alpha$ ,  $Xn\beta$  і т. д., де  $X$  – символ хімічного елементу-випромінювача лінії (Н, Не, С і т. д.), а  $n$  – квантове число рівня, на який здійснюється перехід (нижнього рівня);  $\alpha$ ,  $\beta$  та інші грецькі букви означають зміну порядку переходу  $\Delta n$  (наприклад,  $\alpha$ -лінії відповідають переходу між сусідніми рівнями,  $\beta$ -лінії – переходу через один рівень,  $\gamma$ -лінії – переходу через два рівні і так далі) (рис. 1.2). Заселеність високозбуджених рівнів відбувається зазвичай у результаті рекомбінації електронів і протонів (чи іонів) в іонізованій області, звідки і сама назва ліній – рекомбінаційні.

Самі низькочастотні РРЛ, зареєстровані до теперішнього часу, відповідають переходам між високозбудженими квантовими рівнями і були виявлені Саласом та ін. (РРЛ вуглецю  $C843\alpha$  на частоті 10.9 МГц [30]) для напрямку на залишок наднової (ЗНН) Касіопея А (Cas A). Самі високозбуджені квантові рівні до теперішнього часу були виявлені Степкіним та ін. (РРЛ вуглецю  $C1009\delta$  на частоті близько 26 МГц [31]) для напрямку Cas A. Найбільш високорівневий перехід в РРЛ гідрогену спостерігався Степкіним також для напрямку Cas A на частоті близько 20 МГц ( $H689\alpha$ , [32]). Велика частина усіх РРЛ до теперішнього часу спостерігалася від галактичних об'єктів, переважно ж – від областей Н II. У деяких випадках ці лінії були виявлені і від інших галактик [33 – 37].

Спостереження РРЛ дуже корисні для розуміння фізичних властивостей іонізованих областей в Галактиці. Виміряні інтенсивності і ширина ліній можуть бути використані (разом з теорією формування цих ліній) для виведення температури, а в деяких випадках і щільності областей формування ліній. Доплерівський зсув частоти лінії може бути використаний для визначення радіальної швидкості об'єкта (швидкості уздовж промінь зору). Спостережувана радіальна швидкість при врахуванні моделі галактичного обертання може допомогти у визначенні місцерозташування іонізованої області в Галактиці. Порівняння спостережуваних радіальних швидкостей зі швидкостями інших об'єктів, таких як молекулярні хмари, що лежать на тому ж промені зору, може



бути використане для вивчення зв'язку іонізованого газу з іншими об'єктами. Відношення інтенсивностей РРЛ від двох елементів (наприклад, гідрогену і гелію) можуть, в принципі, привести до визначення їх відносної рясноти.

Як було сказано вище, РРЛ утворюються, коли збуджений електрон в атомі робить перехід між різними енергетичними рівнями, що відповідають різним  $n$ . Внаслідок таких переходів, утворюється серія спектральних ліній з частотами

$$\nu = R \left(1 - \frac{m}{M}\right) cZ^2 \left[ \frac{1}{n^2} - \frac{1}{(n + \Delta n)^2} \right]$$

де  $R$  – стала Рідбергу для нескінченної маси ядра;  $m$  і  $M$  – маси електрона і атома;  $c$  – швидкість світла;  $Z$  – ефективний заряд ядра;  $n$  і  $\Delta n$  – головне квантове число і порядок переходу. Рекомбінаційні лінії покривають широкий діапазон частот – від УФ-хвиль до довгих радіохвиль. Згодом, після першої успішної реєстрації РРЛ, вони були виявлені Хоглундом і Мецгером (РРЛ гідрогену H109 $\alpha$ , [38]). У роботі [39] було повідомлено про перше виявлення РРЛ вуглецю в напрямках W3 і NGC 2024. Надалі РРЛ гідрогену, гелію і вуглецю були виявлені від безлічі областей. В той час, як лінії гідрогену і гелію спостерігалися переважно від гарячих, повністю іонізованих областей, лінії вуглецю спостерігаються від холодніших, частково іонізованих областей.

Із спостережень найбільш інтенсивного  $\alpha$ -переходу в РРЛ може бути визначена електронна температура  $T_e$  шляхом порівняння енергій, яким відповідає продукування лінії, та енергій, які відповідають за нижчележачий континуум (який визначається вільно-вільним випромінюванням). Це один з найбільш точних методів визначення  $T_e$ . Центральна радіальна швидкість лінії та її ширина дають інформацію про систематичні рухи газу й турбулентності, і можуть бути використані для виведення відстані і положення досліджуваної області в Галактиці.

До кінця 1970-х рр. дослідження РРЛ як астрофізичного феномену були прерогативою високочастотної радіоастрономії. Спостереження РРЛ гідрогену, гелію, вуглецю виконувалися переважно на частотах вище за 1 ГГц (що відповідає  $n < 200$ ). Дійсно, РРЛ гідрогену зарекомендували себе як найбільш інформативні,

оскільки за їх формування відповідальний найбільш рясний елемент, іонізований головним чином потужним УФ-випромінюванням від О і В-зорь ( $\lambda < 91.2$  нм) в межах зон Стрьомгрена. Спроби виявити РРЛ гідрогену на великих довжинах хвиль (аж до метрових) були успішними лише для деяких об'єктів. Найбільш низькочастотна до теперішнього часу РРЛ гідрогену була виявлена на радіотелескопі УТР-2 у напрямку ОСН Cas A (H689 $\alpha$ , [32]).

Важливість досліджень низькочастотних РРЛ була очевидною багато років тому [40, 41]. Відповідно до теоретичних припущень [40] очікувалося, що досить інтенсивні (внаслідок стимульованої емісії) низькочастотні (100 – 300 МГц) РРЛ гідрогену можуть формуватися в дифузному, холодному ( $T_e \sim 100$  К,  $N_e \sim 0.03$  см<sup>-3</sup>) середовищі, де відбувається нагрівання та іонізація за допомогою космічних і рентгенівських променів при швидкості іонізації гідрогену  $\xi_H \sim 10^{-15}$  с<sup>-1</sup>. До недавніх пір такі лінії не спостерігалися, і до виявлення Оонком в 2019 році [42] очікувалося, що верхня межа швидкості іонізації гідрогену складає  $\xi_H < 10^{-17}$  с<sup>-1</sup> [17].

Перше виявлення РРЛ вуглецю було зроблене на високих частотах. Після цього вони спостерігалися в напрямках великої кількості областей Н II [43, 44] одночасно з відповідною їй РРЛ гідрогену. Виходячи з атомної фізики, механізм формування ліній вуглецю подібний до формування ліній гідрогену. У даному випадку істотний лише ізотопічний зсув (визначається відношенням мас електрона і атома), тому інтенсивності РРЛ вуглецю і РРЛ гідрогену визначаються ряснотою цих елементів у межах зон Стрьомгрена. Відповідно, лінії вуглецю мають бути слабшими гідрогенних на три порядки величини. Проте, спостережувані інтенсивності ліній вуглецю набагато вищі і порівняні з інтенсивностями гідрогенних ліній. Лінії вуглецю в напрямках областей Н II передбачувано виникають в холодному середовищі ( $T_e \sim 100$  К), що лежить на межах області Н II. Є суворозалежність оптичної товщини РРЛ від температури ( $\tau_L \sim \frac{1}{T_e^{2.5}}$ ), це призводить до несподівано високих інтенсивностей спостережуваних РРЛ вуглецю.

Деякі прості моделі об'єктів, де можуть виникати РРЛ вуглецю, представлені на рис. 1.3. Для об'єкту типу 5 (дифузні області С ІІ, не пов'язані з областю Н ІІ) є лише одне виявлення високочастотної вуглецевої лінії на 1.4 ГГц [45]. Ці об'єкти С ІІ пов'язані з дифузними хмарами Н І, які широкорозповсюджені в Галактиці.

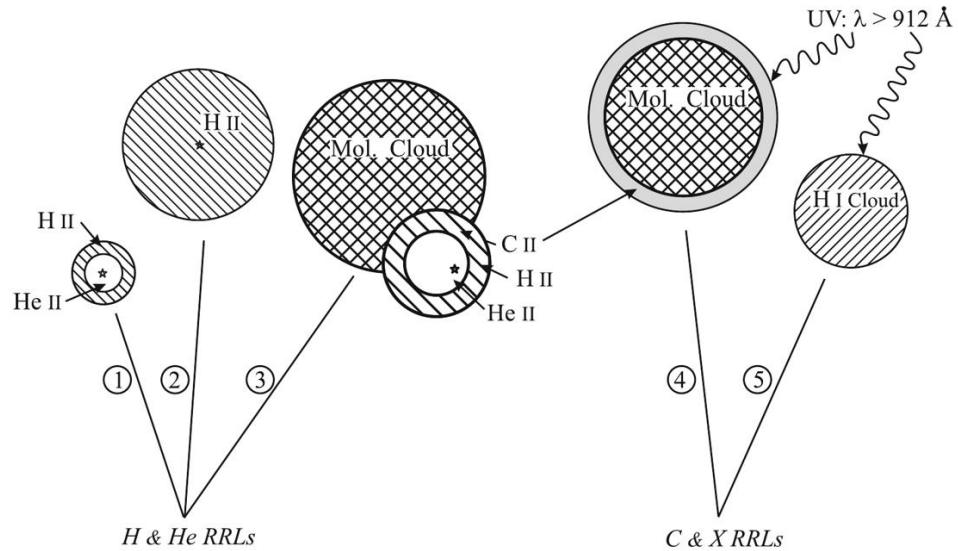


Рис. 1.3. Типи об'єктів МЗС, які можна досліджувати за допомогою РРЛ: 1 - щільні області Н ІІ, 2 – протяжні, низькощільні області Н ІІ, 3 – області С ІІ на межі між молекулярною хмарою і областю Н ІІ, 4 – області С ІІ на поверхні молекулярних хмар (на межі з дифузним середовищем), 5 – області С ІІ усередині хмар Н І. Символом X узагальнені інші хімічні елементи важчі за вуглець, що здатні продукувати РРЛ. Рисунок взятий з роботи [46].

На високих частотах в об'єктах з мірою емісії  $EM < 10^4$  пк · см<sup>-6</sup> РРЛ неможливо виявити. Низькочастотні РРЛ можуть бути також застосовні для вивчення ефектів розширення із зростанням  $n$  і посилення ліній стимульованою емісією. При збільшенні  $n$  заселеності рівнів наближаються до рівноважних, проте зростання безперервної емісії веде до збільшення й стимульованої.

В радіоастрономії інтенсивність випромінювання на частоті  $\nu$  дуже часто виражається в одиницях яскравісної температури при використанні наближення Релея – Джинса для формули планківського чорнотільного випромінювання. Яскравісна температура задається формулою

$$T_{B\nu} = \frac{c^2}{2k\nu^2} I_\nu.$$

Слід зазначити, що в загальному випадку яскравісна температура може бути не тим же самим, що кінетична температура джерела, яке випускає випромінювання. Яскравісна температура еквівалентна температурі абсолютно чорного тіла, яке видає такий же об'єм випромінювання, що і задане джерело в одиниці тілесного кута в одиничному інтервалі частот. Тому яскравісна температура джерела може варіюватися як функція частоти залежно від спектру випущеного випромінювання.

Центральною частотою спектральної лінії є  $\nu$ , яка може бути зміщена відносно очікуваної частоти  $\nu_0$  (заданою формулою Рідберга). Це зрушення обумовлене ефектом Доплера для випадку, коли джерело рухається уздовж променя зору. Частотне зрушення задається нерелятивістською формулою Доплера

$$(\nu - \nu_0) = -\frac{\nu_0}{c} V, \quad (1.1)$$

де  $V$  – швидкість джерела уздовж променя зору. Умовно приймають  $V$  позитивною, коли джерело рухається від спостерігача. У більшості робіт по спектральних радіолініях швидкість джерела вимірюється відносно місцевого стандарту спокою (local standard of rest або LSR).

Форма профілю спектральної лінії залежить від випромінювальних процесів і полів швидкостей у межах випромінюючого газу. Чисто доплерівському уширенню відповідає гауссова форма профілю лінії.

У роботах по спектральних радіолініях зручно використати одиниці радіальної швидкості, визначувані формулою (1.1) для представлення центра лінії та її ширини. Перевага цих одиниць полягає в тому, що вони не залежать від частоти і прямо представляють одну з властивостей області формування ліній.

### 1.3. Основні результати досліджень РРЛ на низьких частотах

Дослідження низькочастотних РРЛ у холодному, частково іонізованому газі на тлі інтенсивного джерела безперервного випромінювання становлять надзвичайно великий інтерес для астрофізики. Вивчення феномену РРЛ у декаметровому діапазоні (найбільш довгохвильовому діапазоні, в якому можна проводити спостереження із поверхні Землі) дозволяють отримувати вкрай важливі результати. Теоретичний аналіз можливостей спостереження низькочастотних РРЛ було виконано у роботах [40, 47 – 49].

Низькочастотні РРЛ вперше були виявлені від вуглецю О. О. Коноваленком та Л. Г. Содіним [50]. За допомогою найбільшого в світі низькочастотного радіотелескопа УТР-2 було виявлено лінію поглинання поблизу частоти 26.131 МГц у напрямку потужного нетеплового радіоджерела – ЗНН Cas A. Хоча спочатку передбачалося, що зареєстрована лінія відповідала переходу в основному стані міжзоряного азоту  $^{14}\text{N}$ , потім вона була ідентифікована як РРЛ вуглецю С631 $\alpha$ , що сформувалася внаслідок переходу між  $n = 632$  та  $n = 631$  [51]. Цю ідентифікацію було підтверджено наступними спостереженнями на УТР-2, що призвели до виявлення лінії С630 $\alpha$  у тому ж напрямку [52]. Зареєстровані РРЛ були унікальними, оскільки були зареєстровані на найнижчій на той час частоті, і при цьому РРЛ вперше спостерігались у поглинанні. У роботах [51, 52] було показано, що області, відповідальні за формування цих низькочастотних ліній, можуть являти собою холодні хмари вздовж променя зору в напрямку Cas A з  $T_e \sim 50$  К,  $N_e \sim 0.1$  см $^{-3}$  і  $EM \sim 0.07$  пк · см $^{-6}$ . У цих холодних областях вуглець може бути практично повністю іонізований фоновим УФ-випромінюванням.

З того часу напрямок Cas A було інтенсивно досліджено в РРЛ вуглецю в діапазоні від 10.9 МГц ( $n = 843$ ) [30] до 1.4 ГГц ( $n = 165$ ) [53]. Лінії спостерігалися у поглинанні нижче 100 МГц і переходили в емісію вище 200 МГц. Цей перехід від поглинання до емісії можна зрозуміти виходячи з простого фізичного розгляду процесу заселеностей різних квантових рівнів. На деяких квантових рівнях інверсія заселення призводить до переважання ролі випромінювальних процесів у

перерозподілі електронів між різними рівнями. Це призводить до стимульованої емісії в лініях. Однак для більш високих квантових чисел великий розмір збуджених атомів призводить до збільшення зіткнень у плазмі, які задають нормальні заселеності. Для цих термалізованих рівнів атоми поглинають фонове випромінювання і випромінюють лінії поглинання, оскільки  $T_{ex} \sim T_e$  та  $T_e \ll T_{BG}$ . Хоча перехід від емісійних ліній до ліній поглинання із збільшенням  $n$  теоретично очікуваний, точне значення  $n$ , при якому він відбувається, залежить від детального розгляду фізичних властивостей середовища. Іншим важливим ефектом на низьких частотах є розширення ліній внаслідок електронних зіткнень і потужного нетеплового поля випромінювання, яке (розширення) є суворою функцією  $n$ .

Джерело інтенсивного радіовипромінювання Cas A знаходиться в галактичній площині на відстані близько 2.8 кпк від Сонця і є ЗНН, що утворився наприкінці XVII ст. Це джерело є важливим інструментом дослідження характеристик МЗС. На промені зору у напрямку Cas A знаходяться холодні міжзоряні хмари, що дозволяє проводити їх дослідження методом просвічування. Завдяки цій обставині найбільша інформація про області С II в холодних хмарах була отримана саме для напрямку Cas A [46].

На рис. 1.4 наведено спектр з одинадцятьма сусідніми декаметровими РРЛ вуглецю, отриманий на радіотелескопі УТР-2 поблизу частоти 26 МГц. Позначення у нижній частині рисунка відповідають положенням частот ліній різних порядків, які також наведені на рис. 1.2. На рис. 1.5 наведено ще два приклади спектрів РРЛ вуглецю, отриманих у напрямку Cas A. Лінія C221 $\alpha$  ( $\nu \approx 600$  МГц) спостерігається в емісії, а серія ліній C571 $\alpha$  – C578 $\alpha$  ( $\nu \approx 34.5$  МГц) – у поглинанні, як і повинно бути при відповідному характеру заселеностей високозбуджених рівнів вуглецю. По вісі ординат відкладено відношення температури в лінії до температури в континумі, який визначається випромінюванням Cas A. РРЛ мають відносні інтенсивності порядку  $10^{-3}$ . Два компоненти, що спостерігаються у спектрі лінії C221 $\alpha$ , при  $V_{LSR} \approx -40$  км/с і  $V_{LSR} \approx -48$  км/с у низькочастотних ліній зливаються внаслідок розширення тиском

і випромінюванням. Профіль ліній  $C571\alpha - C578\alpha$  має характерні для такого розширення витягнуті крила і описується функцією Фойгта.

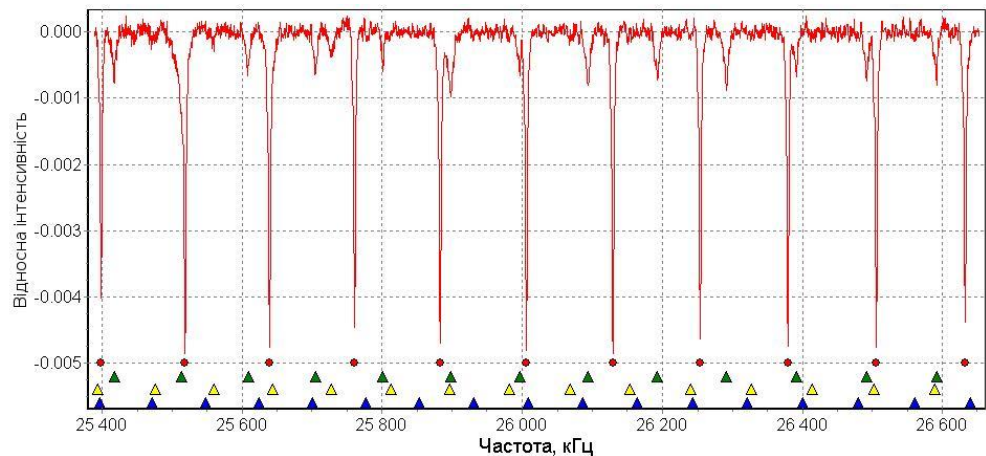


Рис. 1.4. Спектр серії РРЛ, отриманий на УТР-2 поблизу частоти 26 МГц. Червоні кола у нижній частині рисунку відповідають положенням частот  $\alpha$ -ліній, зелені трикутники – положенням частот  $\beta$ -ліній, жовті трикутники –  $\gamma$ -ліній та сині трикутники –  $\delta$ -ліній. Рисунок взятий з роботи [32].

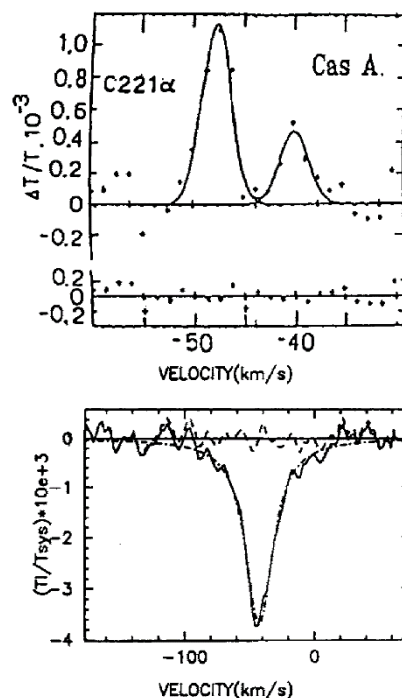


Рис. 1.5. Спектри РРЛ вуглецю, отримані в напрямку Cas A. *Вгорі* – двохкомпонентний спектр емісійної лінії  $C221\alpha$  ( $\nu \approx 600$  МГц), отриманий на радіотелескопі РТ-22, час накопичення складає близько 170 годин. *Знизу* – усереднення восьми переходів (лінії  $C571\alpha - C578\alpha$  при  $\nu \approx 34.5$  МГц),

zareєстрованих у поглинанні на антені «Захід – Схід» радіотелескопа в Гаурібіданурі, час накопичення для одного переходу складає близько 400 годин. Рисунок взятий з роботи [46].

Ширина лінії вуглецю у напрямку Cas A збільшується із зростанням  $n$ , особливо на низьких частотах. Це добре помітно на рис. 1.6, де наведені відомі результати вимірювань. Порівняння зроблено за найбільш інтенсивним компонентом при  $V_{LSR} \approx -48$  км/с. Доплерівська ширина цього компонента на підставі результатів найбільш високочастотних вимірювань прийнята рівною 3.7 км/с. Ширину низькочастотних нерозщеплених профілів зменшено на 8 км/с – відстань між компонентами.

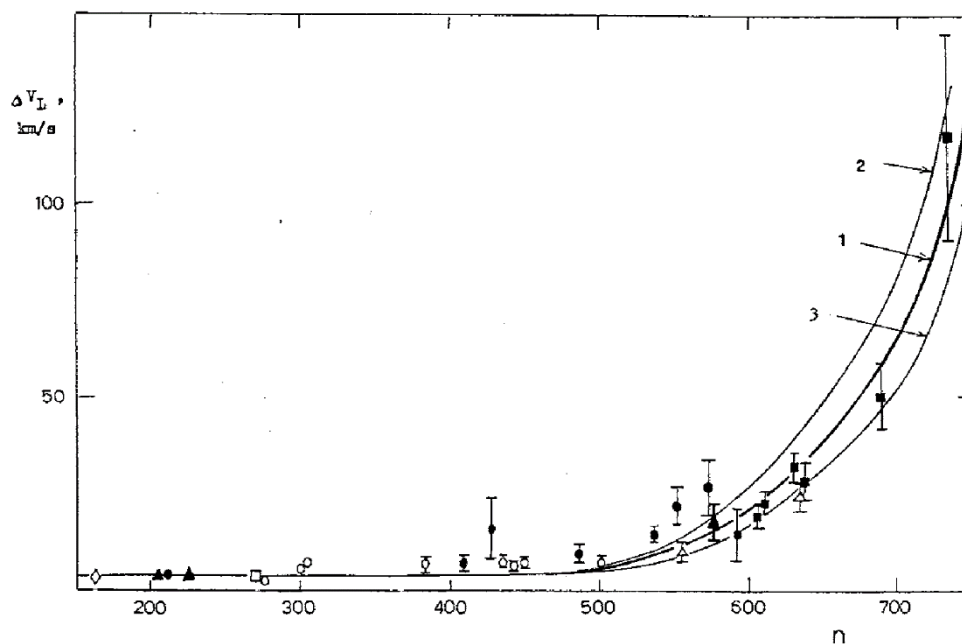


Рис. 1.6. Ширини РРЛ вуглецю в напрямку Cas A як функція головного квантового числа  $n$ . Рисунок взятий з роботи [46].

Вимірювання ширини РРЛ вуглецю, виконані у широкому діапазоні частот, дають важливу інформацію про область С II, але визначити її фізичні умови не дозволяють. Можна лише отримати функціональну залежність між температурою та густиною області С II, що вже, у принципі, допускає моделювання. В розкритті



цієї невизначеності можуть допомогти вимірювання інтенсивності ліній вуглецю, які необхідно проводити також на різних частотах.

Низькочастотні РРЛ вуглецю того ж типу, що спостерігалися у напрямку Cas A, були виявлені у напрямку пилової хмари L1407 [54], у напрямку ділянки галактичної площини G75+00 [55], у напрямках емісійних туманностей NGC 2024, DR21 і S140 [55, 56]. У напрямку центра Галактики РРЛ вуглецю були виявлені в поглинанні на частоті 75 МГц, у напрямку області Н II M16 – на частотах 69 і 80 МГц і у випромінюванні на 328 МГц [57]. Поблизу 76 МГц РРЛ вуглецю були виявлені в поглинанні від багатьох напрямків галактичної площини в інтервалі галактичних довгот  $l = 340^\circ - 20^\circ$  [58]. Також було опубліковано ряд робіт про виявлення низькочастотних РРЛ вуглецю у напрямку ряду позицій у межах площини Галактики [59 – 62].

У напрямку галактичного центра РРЛ вуглецю були виявлені на ряді частот нижче 1 ГГц [64 – 67, 42]. Ці лінії також підпадають під ту ж категорію, що і лінії у напрямку Cas A. Лінії спостерігалися в поглинанні нижче 100 МГц і емісії вище 200 МГц. Вірогідне місце формування цих ліній – холодний нейтральний газ на промені зору у напрямку галактичного центра [67].

РРЛ вуглецю спостерігалися в широкому діапазоні частот від багатьох напрямків у Галактиці, і ці лінії стали ефективним інструментом діагностики частково іонізованого газу в МЗС [68 – 70, 30, 71, 72 – 75, 60, 76 – 77, 61, 17, 31, 32, 36, 37, 78]. РРЛ вуглецю імовірно формуються у двох різних типах областей. Високочастотні лінії ( $\nu > 1$  ГГц) виникають в ОФД поруч із гарячими, щільними областями Н II. Низькочастотні лінії ( $\nu < 1$  ГГц) передбачувано виникають у широкорозподілених компонентах МЗС, можливо, в CNM. Області, відповідальні за випромінювання РРЛ вуглецю, можуть також давати вклад у випромінювання лінії [С II] 158 мк, спостережуваної в площині Галактики [70]. В той час, як властивості областей, відповідальних за високочастотні РРЛ вуглецю, добре відомі, властивості областей, відповідальних за низькочастотні лінії вуглецю, і їх зв'язок з іншими компонентами МЗС значно менше вивчені.

#### 1.4. Великомасштабна структура іонізованого газу в Галактиці. Перспективи подальших досліджень

РРЛ гідрогену були зареєстровані не лише від «класичних» компактних Н II областей, але також і у напрямку позицій, що не містять областей Н II. Перші спостереження такого дифузного іонізованого газу були описані в роботі [79]. Авторами було виявлено досить чітку лінію  $H157\alpha$  в трьох напрямках у першому квадранті галактичної площини. У подальші роки наступні спостереження показали, що фізичні умови такого дифузного газу, відповідального за випромінювані РРЛ, такі ж, як очікувалося швидше від протяжних низькощільних областей, чим від холодного, частково іонізованого газу, як спочатку передбачалося в роботі [80]. Аналіз лінії  $H110\alpha$  від напрямків, де немає дискретних областей Н II, виконаний Шав'єром [81], дав середню електронну густину такого газу в межах  $5 - 10 \text{ cm}^{-3}$ .

Ще одним доказом цих результатів є дифузне випромінювання РРЛ в Галактиці. Спостереження лінії  $H157\alpha$  уздовж площини Галактики в діапазоні  $9.4^\circ < l < 80.6^\circ$  у роботі [82] разом з вимірюваннями лінії  $H166\alpha$  в роботах [83, 84], що покривають довготний діапазон  $358^\circ < l < 50^\circ$ , показали просторову кореляцію між дифузним газом і дискретними областями Н II. Також вони показали, що дифузний газ, випромінюючий РРЛ, не пов'язаний у цьому випадку з газом Н I, припускаючи, що це випромінювання виникає швидше в околі областей Н II, ніж у холодному, частково іонізованому компоненті МЗС.

У роботі [85] передбачалося, що 80% О-зорь, знайдених в роботі [86], і які не знаходяться в межах областей Н II, можуть формувати протяжні області, що називаються протяжним, низькощільним (extended low-density або ELD), повністю іонізованим газом. Мецгер оцінив типові значення для  $T_e$  і  $N_e$  як 7000 К и  $3 \text{ cm}^{-3}$  відповідно. Це було підтверджено спостереженнями лінії  $H272\alpha$  в роботах Анантарамайаха на 325 МГц [64, 65]. Ці вимірювання низькочастотних ліній показали, що основна частина виявленого дифузного випромінювання походить від низькощільних зовнішніх оболонок областей Н II. Довготно-швидкісна

діаграма, побудована за результатами досліджень у роботі [66], показує, що місце розташування дискретних областей Н II загалом співпадає з місцем розташування іонізованого дифузного газу. Спостереження припускають електронну густину в діапазоні  $1 - 10 \text{ см}^{-3}$ , електронні температури в діапазоні  $3000 - 8000 \text{ К}$ , міри емісії в діапазоні  $500 - 3000 \text{ пк} \cdot \text{см}^{-6}$  і розміри  $30 - 300 \text{ пк}$ . У роботі [87] повідомляється про виявлення РРЛ від 418 позицій уздовж площини Галактики ( $l = 0^\circ - 60^\circ$ ) і підтверджується, що випромінювання походить від протяжного, низькощільного теплого іонізованого середовища (ELDWIM) [11], розташованого в галактичних рукавах і що має середні значення  $T_e \sim 7000 \text{ К}$ ,  $N_e \sim 5 \text{ см}^{-3}$  і займає  $\sim 1\%$  від об'єму Галактики.

Походження областей Н II з низькими густинами імовірно завдяки комбінації декількох можливих механізмів. Розширення компактних областей Н II може привести до нижчої електронної густини і мір емісії [66, 88]. Області Н II еволюціонують з велетенських молекулярних хмар за допомогою зоряних вітрів від гарячих зорь, які можуть розвивати кокони навколо них або ізольованих областей Н II, дозволяючи доступному УФ-випромінюванню іонізувати великі площі МЗС [89]. Космічні промені від наднових, хоч спочатку і були єдиним джерелом великомасштабної іонізації [90 - 92, 2], також є можливими вкладниками.

Дифузний іонізований газ спостерігався до теперішнього часу в РРЛ тільки на низьких галактичних широтах, що дає тонкий шар іонізованого газу за шкалою висот в діапазоні від  $36 \text{ пк}$  [93] до  $100 \text{ пк}$  [83, 85, 65], тоді як оптична рекомбінаційна лінія  $H\alpha$  виявлена в іонізованому компоненті аж до дуже високих галактичних широт. У площині і в деяких високоширотних областях, таких як пояс Гулда ( $b = +16^\circ \div +20^\circ$ ), потужне міжзоряне поглинання робить складною інтерпретацію даних  $H\alpha$ .

У роботі [75] низькочастотні РРЛ вуглецю на частоті  $327 \text{ МГц}$  було виявлено в довготному інтервалі  $l = 358^\circ - 20^\circ$  і в деяких позиціях за межами цього інтервалу ( $l = 20^\circ - 89^\circ$ ). На довготах  $l = 0^\circ$  и  $l = 13.9^\circ$  РРЛ були виявлені за межами галактичної площини до  $|b| < 3^\circ$ . Повідомлялося, що виявлена у напрямку

$l = 13.9^\circ$  і в інших позиціях широка РРЛ вуглецю може складатися з декількох вузьких компонентів, що зливаються в один широкий внаслідок невисокої кутової роздільної здатності радіотелескопа ORT (Ooty Radio Telescope). За допомогою спостережень з більш високим кутовим розділенням ці вузькі компоненти профілів ліній були виявлені. Також була виконана інтерпретація результатів, отриманих у роботах [73, 74], визначені фізичні умови в областях формування ліній.

У роботі [62] на ORT був проведений огляд РРЛ поблизу частоти 328 МГц з модернізованою приймальною апаратурою і реєстраторами. Смуга аналізу складала 1.2 МГц, спостереження проводилися в інтервалах  $l = 328^\circ \div 80^\circ$ ,  $b = -3^\circ \div +3^\circ$ . Були зареєстровані РРЛ гідрогену і вуглецю в інтервалі  $l = 330^\circ \div 40^\circ$ , а також в напрямках G78+00 і G46+00. Було оцінено відстань до областей формування ліній в 2 – 5 кпк.

Велика частина виявлених до теперішнього часу низькочастотних РРЛ вуглецю в площині Галактики обмежена областю внутрішньої Галактики з  $l < 20^\circ$ , і утворюються в протяжних областях С II, що співіснують, судячи з усього, з хмарами Н I. Проте, незважаючи на виявлення ліній в цих напрямках, найкращим способом вивчений іонізований газ у напрямку Cas A.

Варто зазначити, що промінь зору у напрямку Cas A перетинає спіральні рукави Оріону і Персея, а виявлене в цьому напрямку поглинання Н I відповідає CNM. Велика частина атомарного гідрогену в Галактиці була охарактеризована за допомогою спостережень як існуючого у вигляді «теплого» ( $\sim 10^4$  К, WNM) і «холодного» ( $\sim 70$  К, CNM) газу. Моделі МЗС показують, що ці дві форми газу знаходяться в рівновазі [2] при середньому тиску, виміряному в околі Сонця,  $2240 \text{ К} \cdot \text{см}^{-3}$ . Холодний газ Н I вивчений за допомогою спостереження лінії Н I в поглинанні відносно континуальних джерел, а також в лінії самопоглинання Н I (Н I self-absorption або HISA). Лінія HISA утворюється внаслідок поглинання холодного хмарного газу Н I відносно яскравого міжхмарного випромінювання Н I. Тоді як температура холодного газу була визначена при дослідженнях лінії поглинання Н I, тиск в такому газі був виміряний за допомогою спостережень

УФ-ліній поглинання С І [94]. Охолодження газу, яке зазвичай відбувається за допомогою переходу тонкої структури С ІІ (найбільш рясна іонна газова фаза в СNM), досліджено за спостереженнями лінії [С ІІ] 158 мк, про що було сказано раніше. Також в роботі [45] були виконані спроби дослідження холодного газу Н І за допомогою РРЛ вуглецю у випромінюванні поблизу 1.4 ГГц.

У роботі [76] було припущено, що виявлені низькочастотні РРЛ вуглецю у напрямку центра Галактики сформувалися в хмарі Рігеля – Кратчера [95], яка добре досліджена в лінії HISA. Холодний газ Н І, спостережуваний за допомогою лінії HISA, всюдисущий у внутрішній Галактиці і складає важливу частину МЗС. Аналіз, виконаний в роботі [76] показав, що комбінування даних РРЛ вуглецю і Н І може дати важливі відомості про природу такого холодного газу.

У роботі [77] були розширені дослідження у напрямку областей, де є реєстрації ліній HISA – були виконані спостереження РРЛ у напрямку області Н ІІ DR21 а також у напрямках ОСН DR4 і НВ21. Також у цій роботі були виявлені РРЛ вуглецю в напрямках G34.2+00 і G34.94+00 поблизу 327 МГц на радіотелескопі Аресібо. Ці лінії сформувалися в дифузних областях С ІІ, які і раніше спостерігалися в площині Галактики.

У період з 2005 до 2013 року огляд низькочастотних РРЛ вуглецю проводився на декаметровому радіотелескопі УТР-2 [61]. При огляді площини Галактики було проведено сканування уздовж галактичної довготи в діапазоні  $l = 0^\circ \div 180^\circ$  із кроком в  $10^\circ$ . РРЛ вуглецю були упевнено виявлені для усіх спостережуваних позицій, причому уперше вдалося зареєструвати РРЛ за межами внутрішньої Галактики (до цього РРЛ там не спостерігалися ні на низьких, ні на високих широтах). Відносні інтенсивності отриманих ліній лежать в інтервалі від  $3 \cdot 10^{-4}$  до  $9 \cdot 10^{-4}$ , ширина ліній в інтервалі від 20 до 50 км/с ( $1.3 \div 4.2$  кГц). Променеві швидкості і відносні інтенсивності досліджених ліній вписуються в стандартну модель диференціального галактичного обертання. Було також зареєстровано збільшення відносних інтенсивностей ліній у напрямку позицій G40+00 і G80+00, що відповідає напрямкам уздовж рукавів Стрільця й Оріону.

Також було виконано картографування галактичної площини з відхиленням по галактичній широті на  $5^\circ$  і  $10^\circ$  при фіксованій галактичній довготі, що також призвело до виявлення РРЛ у ряді випадків. Отримані результати були зіставлені із спектрами лінії Н I у випромінюванні, отриманими при огляді «Лейден – Аргентина – Бонн» (LAV) [96], згладженими до роздільної здатності УТР-2 при вимірюваннях. Було отримано хороше узгодження по радіальних швидкостях, ширині й інтенсивностях ліній. В результаті цього огляду на УТР-2 був зроблений висновок про те, що області формування РРЛ вуглецю концентруються швидше до площини Галактики і знаходяться на відстані до 6 кпк.

Останнім часом велика увага приділяється дослідженню областей за межами внутрішньої Галактики в низькочастотних РРЛ вуглецю. У роботі [97] повідомлялося про виявлення РРЛ вуглецю за межами внутрішньої Галактики в діапазоні частот 50 – 87 МГц у рамках проведення експерименту з пошуку спектральних ліній Н I від ранніх космологічних епох. Незважаючи на досить великі розміри ДН, в роботі [97] вдалося з'ясувати, що області формування РРЛ вуглецю можуть бути широкорозподілені як за межами внутрішньої Галактики, так і на високих галактичних широтах. Особливо важливим є виявлення у цій роботі низькочастотних гідрогенних ліній, що гостро підіймає питання про спосіб іонізації атомів гідрогену далеко за межами областей Н II, і взагалі – галактичної площини.

Спостереження РРЛ вуглецю і гідрогену за межами внутрішніх областей Галактики і на високих галактичних широтах можуть дати відповіді на важливі, фундаментальні астрофізичні проблеми, пов'язані з фізикою МЗС і Галактики в цілому. Потенціал українських радіотелескопів дозволяє в повному об'ємі провести широкомасштабні дослідження РРЛ вуглецю на декаметрових хвилях, де інтенсивності спостережуваних ліній будуть вище й дозволяє визначити розподіл іонізованого газу в Галактиці – як у межах площини, так і далеко за її межами.

Відносно молодий напрям низькочастотних РРЛ вимагає подальшого розвитку. Нині виявлення низькочастотних ліній імовірно обмежене

відношеннями ліній/континуум в декілька одиниць на  $10^{-4}$ . Це обмеження обумовлене поганою роздільною здатністю радіотелескопів, що є наслідком диллюції променя, а також недостатнього часу накопичення. Великі радіотелескопи із заповненою апертурою, працюючі на частотах нижче 100 МГц і здатні спостерігати велику кількість переходів одночасно, можуть дати істотне збільшення в чутливості. Спостереження з високими кутовою роздільною здатністю і чутливістю допоможуть у розумінні тонкої структури іонізованого вуглецю у внутрішній Галактиці. Спостереження в напрямках, де було зареєстровано поглинання  $\text{H I}$  або  $^{12}\text{CO}$ , допоможуть у підтвердженні попереднього висновку про те, що іонізований вуглець в Галактиці пов'язаний з холодним атомарним газом. Спостереження в напрямках за межами внутрішньої Галактики (галактоцентричні відстані більше 8 кпк) з високою чутливістю допоможуть у визначенні того факту, що низькочастотні РРЛ вуглецю є широкорозподіленим, квазіізотропним по небесній сфері явищем, або обмежені лише внутрішньою Галактикою. Нині передбачається, що висока частина виявлень у внутрішній Галактиці може бути обумовлена потужним нетепловим фоном у цій області.

При теоретичних дослідженнях необхідно поліпшити розуміння впливу ефектів довкілля на заселеності високих ридбергівських рівнів. Хоча були окреслені найбільш вірогідні моделі областей формування ліній вуглецю, все ще лишається багато питань.

## **1.5. Висновки по розділу 1**

Були розглянуті фізичні механізми формування низькочастотних РРЛ вуглецю в дифузному, розрідженому середовищі в Галактиці. Ці лінії, виявлені більше 40 років тому, за роки досліджень стали найбільш вдалим засобом діагностики космічної плазми в областях МЗС, де відсутні області  $\text{H II}$ ,  $\text{O III}$  та інші потужні джерела іонізації газу.

Найбільший об'єм інформації був отриманий для середовища в рукаві Персея, що лежить у напрямку потужного радіоджерела – ЗНН Cas A. Лінії були виявлені в діапазоні частот від 10.9 МГц до 1.4 ГГц. Низькочастотні лінії, уперше зареєстровані у кінці 1970-х років, показали цілий ряд особливостей, до того невідомих: лінії спостерігалися в поглинанні, мали порівняно великі з метровим діапазоном інтенсивності (що може говорити про участь в заселеності рівнів механізму низькотемпературної диелектронної рекомбінації), мали більшу ширину, ніж раніше досліджені лінії (внаслідок переважання в загальному розширенні лінії механізмів розширення тиском і випромінюванням). Отримання таких значних результатів обумовлене тим, що у напрямку Cas A розташовані міжзоряні хмари, що лежать на промені зору при радіальних швидкостях  $-47$  і  $-38$  км/с, в яких відбувається поглинання потужного радіовипромінювання від Cas A. Вивчення таких хмар методом «просвічування» потужним континуальним радіовипромінюванням представляє гарну можливість визначення фізичних умов у таких хмарах – електронної температури, електронної густини, міри емісії, механізмів іонізації, рекомбінації і т. д.. Асоціація областей С II з хмарами H I, які широкорозподілені в Галактиці і квазіізотропно тягнуться аж до гало (до високих галактичних широт), дає основу припускати, що низькочастотні РРЛ вуглецю також широкорозподілені в Галактиці, і за умови забезпечення високої чутливості вимірювань їх можна виявити у багатьох напрямках Галактики аж до високих галактичних широт. За допомогою реєстрації низькочастотних ліній вуглецю й аналізу їх відносних інтенсивностей можна судити про розподіл іонізованого вуглецю в Галактиці. Це, у свою чергу, допоможе проводити дослідження питань еволюції та енергетики МЗС, у тому числі і проблеми зореутворення.

Основні положення та результати розділу викладені у публікаціях автора [108, 32].



## РОЗДІЛ 2

### АНТЕНИ ТА АПАРАТУРА ДЛЯ НИЗЬКОЧАСТОТНОЇ РАДІОСПЕКТРОСКОПІЇ

#### 2.1. Радіотелескоп УТР-2 як найбільш ефективний інструмент для досліджень низькочастотних РРЛ

Одразу після виникнення радіоастрономії як науки у 1931 році було виявлено, що декаметровий діапазон радіохвиль – найбільш довгохвильовий діапазон електромагнітного випромінювання, у якому можна проводити спостереження із поверхні Землі, – має вкрай серйозні недоліки та проблеми для дослідників. Серед них можна назвати високу яскравісну температуру нетеплового галактичного тла (яка визначає шумову температуру приймальної системи радіотелескопа та не може бути знижена взагалі), багаточисельні інтенсивні радіозавади земного походження різних типів, негативний вплив середовища розповсюдження (перш за все, іоносфери), низька кутова роздільна здатність довгохвильових радіотелескопів (мале співвідношення розміру апертури до довжини хвилі). Разом з тим, теоретичні оцінки показували, що радіоастрономічні дослідження у декаметровому діапазоні можуть надавати унікальну інформацію, недоступну вимірювань у більш короткохвильових діапазонах. Серед них можна назвати сильну взаємодію речовини із випромінюванням, суттєве перевищення інтенсивності нетеплового радіовипромінювання над тепловим, формування багатьох типів нетеплового радіовипромінювання із крутими спектрами, а також сильну стимульовану емісію для високозбуджених міжзоряних атомів у МЗС [98].

Дослідження низькочастотних РРЛ вуглецю є досить складною спостережною задачею. Лінії мають вкрай низьку інтенсивність (порядку  $10^{-3} \div 10^{-4}$  відносно континууму). Труднощі спричиняються, як було сказано вище, високими яскравісними температурами галактичного тла ( $\sim 40\,000$  К при 25 МГц), високим рівнем радіочастотних завад, а також мінливими умовами в

іоносфері. Для усунення цих труднощів і подальших успішних спостережень низькочастотних РРЛ вуглецю використовуване обладнання та методи повинні відповідати ряду суворих вимог. Особливі вимоги ставляться до радіотелескопа. Він повинен мати хорошу чутливість (яка визначається правильним співвідношенням між великою ефективною площею і високою роздільною здатністю), можливість працювати у широкому діапазоні частот, мати високий коефіцієнт корисної дії (ККД) і високу направленість. Спектрометр для цих досліджень повинен мати високу частотну роздільну здатність.

Цим вимогам у повній мірі відповідає український радіотелескоп УТР-2 (Український Т-подібний радіотелескоп, друга модель) [99, 100]. Цей інструмент за принципом свого будування являє собою фазовану антенну решітку (ФАР) з електричним керуванням ДН, що має сумарну ефективну площу близько 140000 м<sup>2</sup> (найбільшу в світі для декаметрових радіотелескопів). УТР-2 має високу направленість за двома координатами ( $> 2 \cdot 10^6$  положень променя (1024(положень за  $u$ )  $\times$  2048(положень за  $v$ ))), великий динамічний діапазон, низький рівень бокових пелюсток, багатопроменевість, високу стійкість до завад, високу стабільність роботи усіх систем та вузлів, гнучку конфігурацію, що робить його унікальним інструментом для високочутливих досліджень у декаметровому діапазоні, який є найбільш важким для спостережень. Будівництво УТР-2 завершилося у 1970 році, і з 1972 року він безперервно працював за цілим спектром радіоастрономічних науково-пошукових програм.

Радіотелескоп УТР-2 має робочий діапазон частот 8 – 32 МГц і складається з 2040 симетричних широкосмугових горизонтальних шунтових вібраторів (диполів Надененко) з однією лінійною поляризацією, вісі яких орієнтовано вздовж паралелі. УТР-2 має Т-подібну конфігурацію, що включає в себе дві прямокутні ФАР – «Північ – Південь» та «Захід – Схід» (рис. 2.1). Антена «Північ – Південь» складається із 1440 вібраторів (шість рядів по 240 вібраторів у кожному ряді), розташована вздовж меридіану та відповідає за максимальну роздільну здатність радіотелескопа за схиленням. Антена «Захід – Схід» складається із 600 вібраторів (шість рядів по 100 вібраторів у кожному ряді),

розташована вздовж паралелі та відповідає за максимальну роздільну здатність відносно прямого піднесення. Розміри антен «Північ – Південь» та «Захід – Схід» складають  $1855 \text{ м} \times 55 \text{ м}$  та  $901 \text{ м} \times 48 \text{ м}$  відповідно.

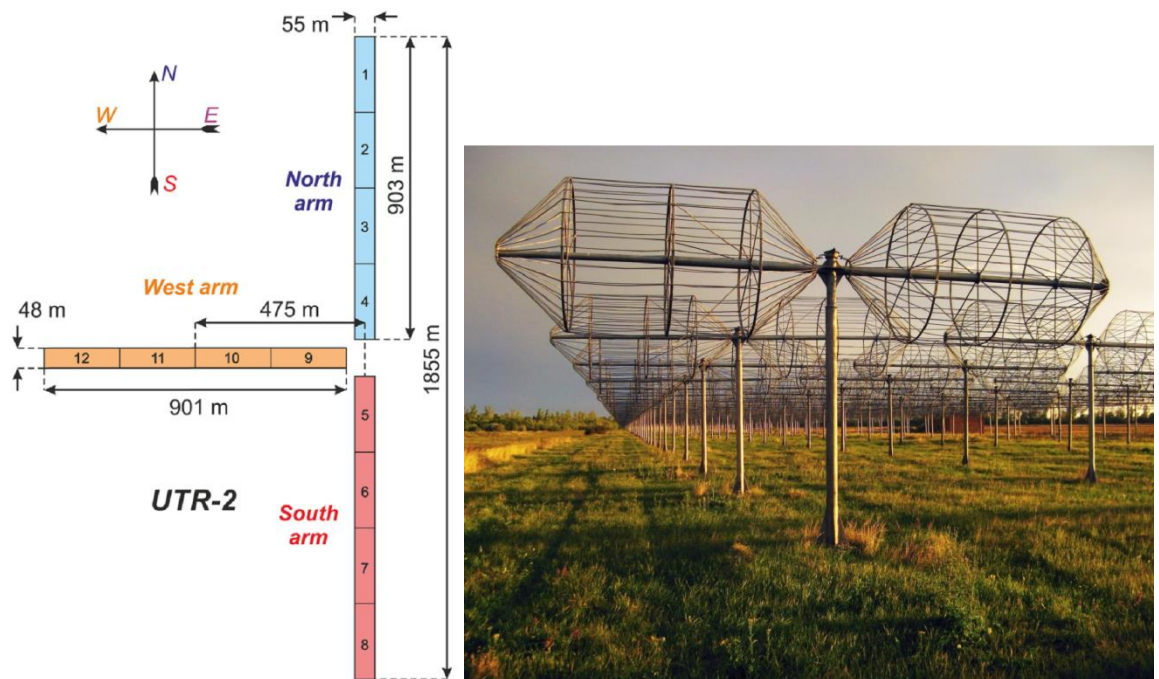


Рис. 2.1. *Ліворуч* – конфігурація радіотелескопа УТР-2; *праворуч* – антена «Північ – Південь» радіотелескопа УТР-2. Рисунок узятий з роботи [100].

Керування променем УТР-2 відбувається дискретними перемиканнями у лініях затримок у секторі огляду  $-0.84 \leq u \leq 0.84$  та  $-1 \leq v \leq 1$ , де  $u = \cos(\Delta)\cos(A)$  та  $v = \cos(\Delta)\sin(A)$  – направляючі косинуси,  $\Delta$  та  $A$  – зенітний кут та азимут відповідно [114]. Усунення великих дифракційних пелюсток забезпечується відстанню між вібраторами у  $7.5 \text{ м}$  вздовж лінії північ – південь і в  $9 \text{ м}$  вздовж лінії захід – схід.

УТР-2 має багатоступеневу асинхронну систему фазування за принципом часової затримки та розподілену багаторусну систему антенного підсилення [101, 102]. Система фазування складається із 439 фазообертачів з кабельними лініями затримки, що перемикаються, і дозволяє проводити вимірювання як на всьому радіотелескопі, так і на кожній з 8 секцій антени «Північ – Південь» та 4 секцій антени «Захід – Схід» або при різних їх комбінаціях. Розміри однієї секції

антени «Північ – Південь» складають  $225 \text{ м} \times 55 \text{ м}$ , однієї секції антени «Захід – Схід» –  $225 \text{ м} \times 48 \text{ м}$ .

Система формування променів, що використовується в радіотелескопі, дозволяє одночасно проводити спостереження на п'яти променях, рознесених приблизно на  $0.5^\circ$  по схиленню один від одного.

Відомо, що Т-подібна конфігурація радіотелескопа має ті ж властивості, що й конфігурація типу хреста Міллса відповідно до розмірів більшого плеча антени в термінах заповнення  $uv$ -площини, форми ДН та її ширини. Відповідно до цього, «ножові» ДН антен «Північ – Південь» та «Захід – Схід» будуть мати розміри  $\alpha \times \delta = 12^\circ \times 20'$  та  $\alpha \times \delta = 40' \times 12^\circ$  відповідно на частоті 25 МГц. При перемноженні ДН обох антен результуюча «олівцева» ДН для променя, орієнтованого в зеніт, буде мати ширину на рівні половини потужності  $25' \times 25'$  на частоті 25 МГц [100].

Слід відмітити, що УТР-2 є кореляційним радіотелескопом і з причини того, що геометричні центри антен «Північ – Південь» та «Захід – Схід» не співпадають, цей радіотелескоп нечутливий до розподіленого фонового випромінювання або протяжних радіоджерел з розмірами, що перевищують  $3^\circ$ .

Флуктуаційна чутливість радіотелескопа УТР-2  $\Delta S_{min}$  може бути виведена з рівняння радіометру [100]

$$\Delta S_{min} = \frac{2kT}{A_{eff} \sqrt{\Delta f \cdot \Delta t}} = \frac{2 \cdot 1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 4 \cdot 10^4}{1.4 \cdot 10^5 \sqrt{3 \cdot 10^6 \cdot 3.6 \cdot 10^3}} \approx 10 \text{ мЯн},$$

де  $A_{eff}$  – ефективна площа на середній частоті робочого діапазону ( $140000 \text{ м}^2$  на 20 МГц), що при зенітному положенні ДН відповідає геометричній площі антени;  $T$  – системна температура, в якій превалює галактичне тло при температурі  $\sim 40000 \text{ К}$  на частоті 20 МГц;  $\sqrt{\Delta f \cdot \Delta t}$  – радіометричний виграш, де  $\Delta f = 3 \text{ МГц}$  – смуга аналізу та  $\Delta t = 1 \text{ година}$  – час накопичення сигналу. Чутливість наведена в Янських – одиницях вимірювання спектральної густини потоку в радіоастрономії ( $1 \text{ Ян} = 10^{26} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{Гц}$ ) Взагалі, флуктуаційна чутливість УТР-2 може варіюватись у межах від декількох мЯн до декількох Ян в залежності від досліджуваних напрямків, спостережуваних частот, координат досліджуваних об'єктів, часу накопичення, частотної роздільної здатності. Для радіоспектроскопічних

досліджень, а саме – для досліджень низькочастотних РРЛ вуглецю, – є можливість реалізувати рекордну, вкрай високу чутливість. Це можна зробити завдяки можливості реалізувати великі часи накопичення та некогерентного усереднення спектральних даних, високій направленості УТР-2, великому динамічному діапазону, що дає спостереженням заводо захищеність, а також подальшому усередненню величезної кількості одночасно спостережуваних РРЛ, відстань між якими на декаметрах складає близько 150 кГц (лише до смуги частот 20 – 30 МГц потрапляє більше 100 РРЛ) і зменшується із зниженням частоти. Все це робить український радіотелескоп УТР-2 найефективнішим у світі інструментом для радіоспектроскопічних досліджень, зокрема – для досліджень РРЛ.

## **2.2. Прилади для радіоастрономічної спектроскопії**

У розділі 2.1 було сказано про те, що на радіоастрономічні дослідження у декаметровому діапазоні одночасно впливає цілий ряд негативних факторів, у зв'язку з чим проведення спостережень стикається з багатьма труднощами, пов'язаними головним чином із забезпеченням необхідної чутливості вимірювань. Як було зазначено, дослідження РРЛ у декаметровому діапазоні додатково ускладнюються їхніми вкрай низькими відносними інтенсивностями (порядку  $10^{-3}$  –  $10^{-4}$ ). Відповідно, приймальна апаратура радіотелескопа повинна мати оптимальні робочі характеристики для радіоспектроскопічних досліджень, що відповідають суворим вимогам – мати великий динамічний діапазон, якомога більш широку смугу аналізу та високу частотну роздільну здатність.

За багато років радіоспектроскопічних досліджень на УТР-2, починаючи з кінця 1970-х років, добре зарекомендували себе спектроаналізатори на базі цифрових автокорелометрів (ЦК), створені О. О. Коноваленком, А. О. Голинкіним, С. В. Степкіним [103 – 105, 17, 106 – 108, 32].

В аналізаторі спектру кореляційного типу визначається кореляційна функція  $R(\tau)$  сигналу  $x(t)$  у смузі  $B$ , за допомогою якої потім визначається спектральна густина потужності

$$G(f) = 2 \int R(\tau)w(\tau) \cos 2\pi f\tau d\tau,$$

де  $w(\tau)$  – вагова функція (кореляційне вікно).

У роботі [109] був уперше описаний спектроаналізатор на основі знакового корелометру, створеного на базі цифрової техніки. Такі пристрої найбільш підходять для визначення енергетичних спектрів гаусових випадкових процесів. Принцип роботи такого пристрою полягає у вимірюванні дискретної знакової кореляційної функції сигналу  $x(t)$

$$R(mT) = \sum_{i=1}^M \text{sgn}[x(iT)] \text{sgn}[x(iT + mT)],$$

де  $I$  – число періодів тактового сигналу,  $m$  – номер кореляційного каналу,  $M$  – розмір виборки,  $T$  – період дискретизації вхідного сигналу.

Сигнал з антенної системи радіотелескопа надходить на широкопasmовий приймач, де він піддається фільтрації, підсиленню та повторній фільтрації на проміжній частоті (рис. 2.2). Далі сигнал проміжної частоти надходить на вхід компаратора, де відбувається його дворівнева дискретизація (кліпування). Сигнал  $y(t)$  на виході компаратора дорівнює [105]:

$$\begin{aligned} y(t) &= 1 \quad \text{при } x(t) \geq 0 \text{ та} \\ y(t) &= 0 \quad \text{при } x(t) < 0, \end{aligned}$$

де  $x(t)$  – сигнал проміжної частоти на виході з широкопasmового приймача.

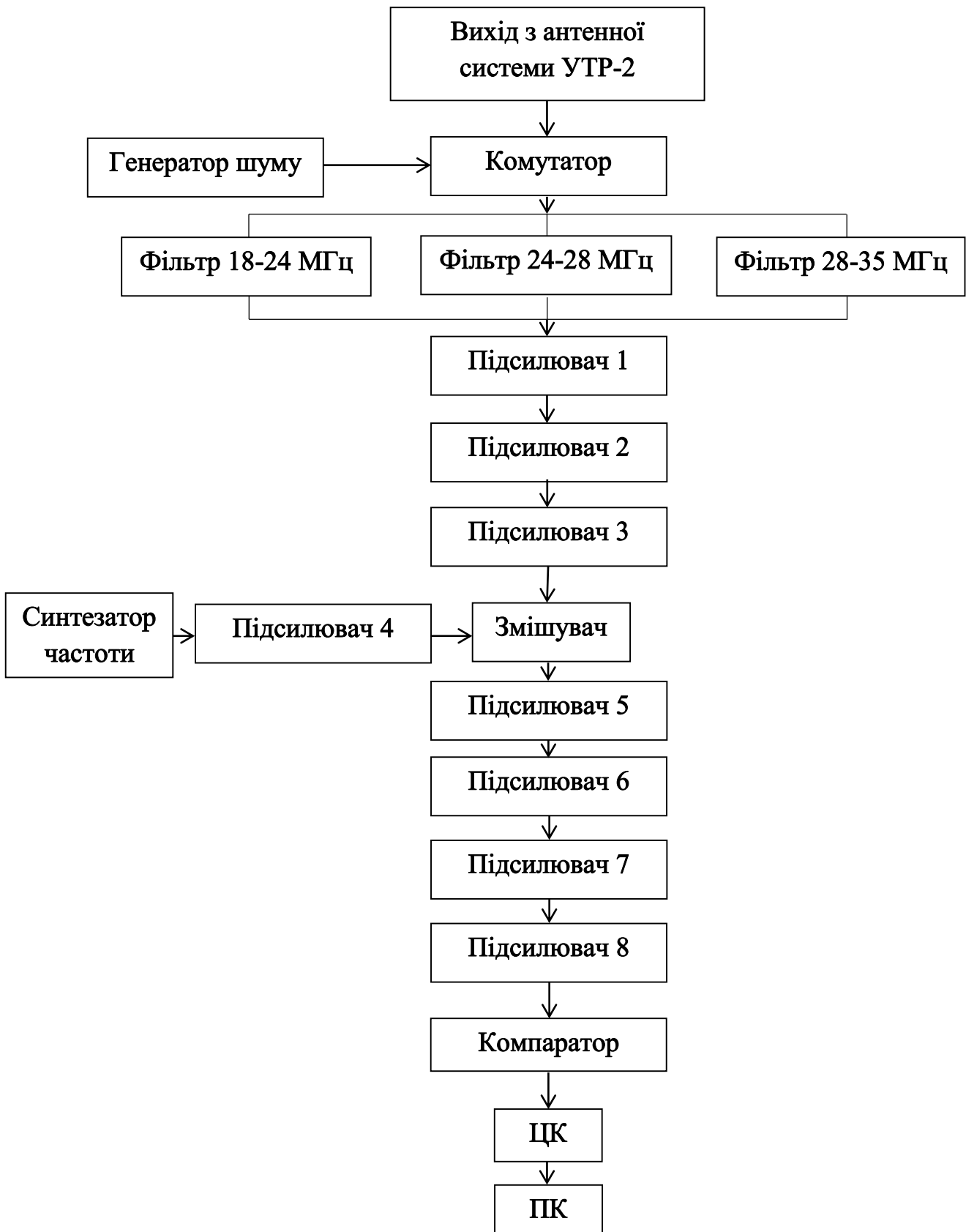


Рис. 2.2. Спрощена блок-схема широкосмугового приймача з ЦК для радіоспектроскопії на УТР-2.

Після цього сигнал з виходу компаратора надходить на вхід ЦК, кожний з каналів якого реалізує функцію

$$K(mT) = \sum_{i=1}^M y(iT) \oplus y(iT - mT) \oplus F_{mod},$$

де  $i = 1, 2, \dots, M$  – поточне число періодів тактового сигналу,  $M$  – об'єм вибірки (дорівнює загальному числу тактів накопичення),  $m = 1, 2, \dots, 7$  – номер кореляційного каналу (еквівалентний дискретній затримці вхідного сигналу),  $y(iT)$  – поточне значення вхідного клішованого сигналу,  $y(iT - mT)$  – затримане на  $m$  тактів значення вхідного сигналу,  $F_{mod}$  – меандр з частотою  $f_{mod}$ , що надходить з виходу лічильника об'єму вибірки,  $\oplus$  – додавання за модулем 2,  $T$  – період дискретизації.

Дані, отримані на ЦК, надходять до ПК, де вони накопичуються та проходять первинну обробку. Енергетичний спектр згідно з теоремою Вінера – Хінчина розраховується за формулою

$$G(f) = \frac{TR(0)}{M} + 2T \sum_{i=1}^N w(nT) \sin\left(\pi \frac{R(nT)}{2M}\right) \cos(2\pi f nT),$$

де  $N$  – число кореляційних каналів,  $w(nT)$  – вагова функція, що визначає форму кореляційного вікна.

Оскільки в основі мікросхем, на базі яких побудовані ЦК, використовуються нереверсивні лічильники, накопичені дані необхідно відцентрувати:

$$R(mT) = K(mT) - \frac{M}{2}.$$

Під час аналізу низькочастотного процесу зі смугою  $B$  період дискретизації  $T$  обирається відповідно теоремі Котельникова – Найквіста

$$T \leq \frac{1}{2B}.$$

У випадку, якщо сигнал зсунутий вище по частоті на деяку величину  $f_0$ , необхідно також забезпечити виконання додаткової умови [103]:



$$T = \frac{2k + 1}{4f_0},$$

де  $k = 0, 1, 2, \dots$ .

Роздільна здатність спектрометра  $\Delta f$  у випадку прямокутного кореляційного вікна ( $w(nT) = 1$ ) дорівнює [105]:

$$\Delta f = \frac{1}{2NT},$$

де  $N$  – число кореляційних каналів.

Дисперсія визначається рівнянням [105]:

$$\sigma^2 = \frac{\pi^2}{4\tau\Delta f},$$

де  $\tau$  – загальний час накопичення.

Перший ЦК для радіоспектроскопії МЗС на УТР-2 був створений О. О. Коноваленком у 1976 році [103]. Цей 32-канальний однобітовий пристрій з робочою смугою аналізу близько 100 кГц був першим у колишньому СРСР цифровим спектроаналізатором (рис. 2.3). Завдяки йому вдалося вперше виявити низькочастотні РРЛ вуглецю у поглинанні [50, 52]. У 1985 – 1990 роках було розроблено та впроваджено в експлуатацію 128-канальний ЦК на мікросхемах серії 155 високого ступеню інтеграції [104]. Смуга аналізу цього пристрою дозволяла одночасно реєструвати чотири РРЛ, які можна було усереднити та значно підвищити чутливість вимірювань, завдяки чому стало можливим зареєструвати РРЛ вуглецю у напрямках туманностей DR21, S140 та пилової хмари L1407 [54, 56]. Також у наступні роки було розроблено та введено в експлуатацію п'ять поколінь ЦК із прямим введенням даних у ПК:

- 1) 1024-канальний ЦК на мікросхемах серії 155 високого ступеню інтеграції (частотна смуга аналізу 1 МГц);
- 2) 96-канальний ЦК на спецмікросхемах К2УФ1891 (частотна смуга аналізу 10 МГц) (рис. 2.3);
- 3) 128-канальний ЦК на спецмікросхемах К2УФ1891 (частотна смуга аналізу 10 МГц) [105];

- 4) 4096-канальний ЦК на спецмікросхемах Canaris (частотна смуга аналізу 30 МГц);
- 5) 32-канальний ЦК для моніторингу радіозавод на мікросхемах серії 155 (частотна смуга аналізу 10 МГц) [110].

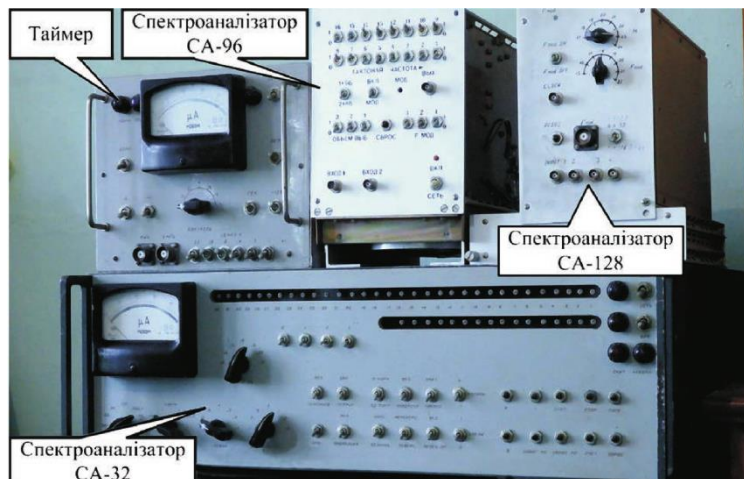


Рис. 2.3. Три покоління спектроаналізаторів на базі ЦК, що використовувалися на радіотелескопі УТР-2 (32-канальний, 96-канальний та 128-канальний ЦК). Рисунок взятий з роботи [108].

4096-канальний ЦК, що дозволяє проводити радіоспектроскопічні спостереження із вкрай високою частотною роздільною здатністю (яка обумовлюється кількістю каналів ЦК та періодом дискретизації), є найбільш ефективним приладом для низькочастотної радіоспектроскопії міжзоряного середовища (рис. 2.4). За його допомогою стало можливим дослідити лінії від найбільш збуджених атомів у міжзоряному просторі ( $n > 1000$ ) [31]. До смуги аналізу цього ЦК одночасно потрапляє близько десяти РРЛ вуглецю, усереднення яких дасть вигравш в 10 разів для часу накопичення і більш, ніж у три рази підвищить чутливість вимірювань ( $\Delta S \propto \sqrt{N}$ , де  $N$  – кількість усереднених ліній).



Рис. 2.4. *Ліворуч* – широкосмуговий приймач, *праворуч* – 4096-каналний ЦК.

### 2.3. Широкопругові цифрові спектральні процесори

Незважаючи на те, що багатоканальні ЦК є високоефективними пристроями для радіоспектроскопічних досліджень, однобітове квантування може бути недостатнім у разі потрапляння в смугу аналізу високоінтенсивної радіозавади. Також, обмежена частота дискретизації вхідного сигналу та, відповідно, відносно вузька смуга аналізу обмежує використання ЦК для досліджень радіоджерел з широкими частотними властивостями спектра.

У зв'язку з прогресом у цифровій та обчислювальній техніці, стало можливим впроваджувати радіоприймачі та спектроаналізатори нового покоління на новітній елементній базі та з багатьма рівнями квантування сигналу. Починаючи з 1998 року на радіотелескопі УТР-2 були впроваджені декілька поколінь багатобітних швидкодіючих цифрових приймачів [111]. Завдяки модернізації системи антенного підсилення УТР-2 [102] стало можливим проводити спостереження у всій робочій смузі частот – від 8 до 32 МГц (до цього було можливим проводити спостереження у вузьких відносно шести дискретних частот, виходячи з можливостей тогочасної аналогової радіоприймальної апаратури). Нові приймачі могли як безпосередньо записувати на ПК весь сигнал, що надходить з антенної системи після підсилення, так і виконувати спектральну обробку вхідного сигналу в режимі реального часу шляхом швидкого перетворення Фур'є (Fast Fourier Transform або FFT). Однак, в цих пристроях

смугу аналізу було обмежено приблизно 10 МГц, виходячи з чого для здійснення спостережень за різними програмами потрібно було виконувати перетворення частоти за допомогою змішувачів, які хоч і мали великий динамічний діапазон, але мали нелінійність і, тим самим впливали на лінійність роботи усього цифрового приймача.

Для лінійності та високої стабільності роботи спектроаналізатора та усієї приймальної системи пристрій не повинен мати перетворення частоти, а тому – бути широкосмуговим. Пристрої з частотою дискретизації, що не менш як удвічі перевищує верхню частоту діапазону роботи радіотелескопа, можуть працювати у всьому безперервному діапазоні робочих частот інструменту, що дасть більш великий динамічний діапазон у порівнянні з попередніми поколіннями цифрових спектроаналізаторів. До таких пристроїв відноситься 16-бітний цифровий широкосмуговий спектроаналізатор DSP-Z (Digital Spectropolarimeter, Z-type), що був розроблений у Радіоастрономічному інституті НАН України, який почав використовуватися на радіотелескопі УТР-2 з 2006 року [111 – 113].

У 2010 році на УТР-2 було встановлено п'ять комплектів спектроаналізаторів DSP-Z (на кожен з п'яти променів радіотелескопа, рис. 2.5). Разом з цим, DSP-Z було модернізовано. Більш рання версія цього приймача (2006 – 2010) разом із режимом безпосереднього запису на ПК сигналу, що надходить з антенної системи (всехвильовий режим або “waveform”), видавала також два паралельні потоки даних від двох вхідних каналів: автокорекції кожного з двох входів або автокореляцію одного з входів і амплітуду крос-кореляційного спектру з двох входів. Після модернізації 2010 року стало можливим отримувати весь комплексний крос-кореляційний спектр – синусні та косинусні частини крос-спектра в доповнення до автокореляційного спектра двох вхідних каналів. Це дозволило почати поляризаційні спостереження на радіоінтерферометрі УРАН з двох поляризаційними вібраторами, а для однополяризаційного УТР-2 дало змогу апаратно виконувати перемноження сигналів від антен «Північ – Південь» і «Захід – Схід», що дає синтезований

«олівцевий» промінь діаметром приблизно  $0.5^\circ$ . Основні технічні характеристики спектроаналізатора DSP-Z наведено в таблиці 2.1.



Рис. 2.5. П'ять цифрових спектроаналізаторів DSP-Z, встановлених на УТР-2. Рисунок взятий з роботи [111].

Принцип роботи DSP-Z базується на безпосередньому записі даних у всій смузі аналізу радіотелескопа УТР-2 без будь-якого перетворення частоти. Це дозволяє уникнути труднощів, які можуть бути спричинені потужними завадовими сигналами, що потрапили до смуги аналізу. Обладнання приймача складається з двох частин (рис. 2.6 *c* та *d*) – модуля аналого-цифрового перетворювача (АЦП) та самої плати цифрової обробки сигналів (digital signal processing (DSP)). Блок-схема АЦП та DSP наведена на рис. 2.7. АЦП та DSP поєднані між собою двоканальним кабелем послідовної передачі даних зі швидкістю 5 Гбіт/с (якщо обидва пристрої знаходяться в одному системному блоці ПК) або оптоволоконним кабелем. В модулі АЦП використовується 16-бітний аналого-цифровий конвертер LTC2208. Буферизація даних та канална логіка реалізуються за допомогою FPGA Spartan3. Вхідні потоки даних можуть бути дискретизовані з будь-якою швидкістю через внутрішній або зовнішній тактовий генератор аж до  $f_s = 130$  МГц.

Таблиця 2.1

## Технічні характеристики спектроаналізатора DSP-Z

Число вхідних каналів	2
Робочий діапазон частот	0 – 35 МГц
Частота дискретизації	66 МГц (внутрішня) 10 – 70 МГц (зовнішня)
Синхронізація часу	1 імпульс за секунду (1 pps) на вході
FFT	Автоспектри і комплексні кореляційні крос-спектри
Довжина вікна FFT/біт роздільної здатності	16384/30
Кількість частотних каналів	8192
Частотна роздільна здатність (при частоті дискретизації $f_s = 66$ МГц)	4 кГц
Час накопичення при $f_s = 66$ МГц	0.25 – 128 мс
Роздільна здатність АЦП	16 біт
Запис у режимі “waveform”	Необмежена тривалість
Вхідний імпеданс	50 Ом
Максимальна амплітуда вхідного сигналу	$\pm 1$ В
Динамічний діапазон	74 дБ
Рівень власних шумів	-117 дБ

Перекриття вікон FFT	50%
Точність накопичених значень	54 біти

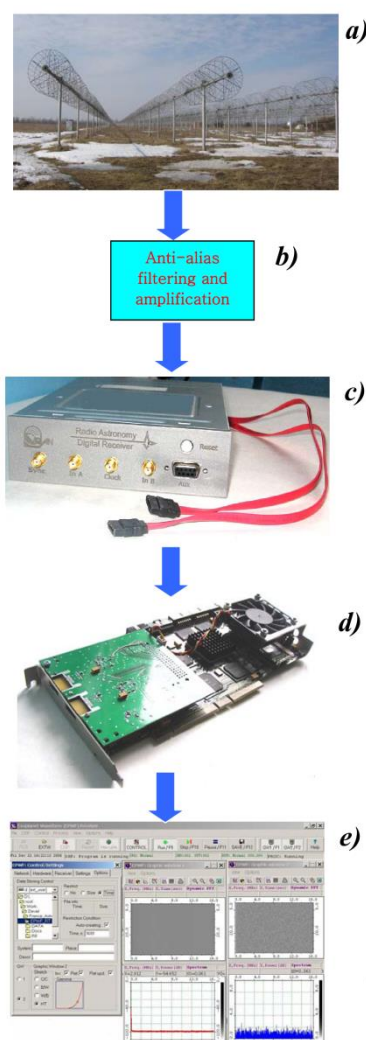


Рис. 2.6. Схема шляху сигналу від антенної системи до робочого вікна програми відображення та контролю радіоспектроаналізатора DSP-Z. Рисунок взятий з роботи [113].

Плата DSP базується на використанні Xilinx Virtex-II 3000 як FPGA (ПКВМ – програмована користувачем вентилярна матриця) та сигнального процесора з фіксованою точкою TMS320C6416 та картою пам'яті на 256 Мбайт [113]. Для зменшення впливу паразитних сигналів, що генеруються платою DSP, модуль АЦП реалізовано у вигляді окремого блоку. Теоретично максимальне відношення



сигнал/шум для 16-бітного аналого-цифрового конвертера складає 78 дБ, однак на практиці реалізоване значення 74 дБ (див. таблицю 2.1).

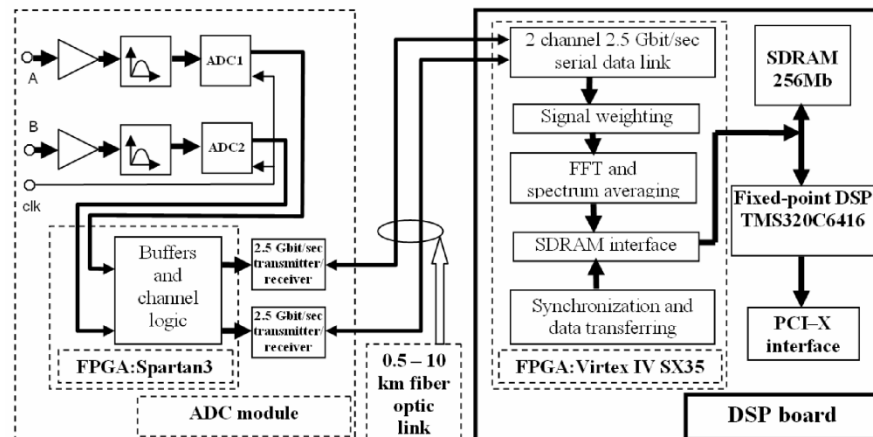


Рис. 2.7. Блок-схема приймача АЦП та плати DSP. Рисунок взятий з роботи [113].

Цифровані дані з АЦП подаються на плату DSP, де в FPGA виконується віконне FFT в режимі реального часу (з або без перекриття 50%) та спектральне усереднення. Модифікований алгоритм FFT на 16384 точки дає 8192 частотних канали у смузі аналізу.

Для контролю параметрів приймача, процесу запису даних а також у відображенні сигналів у реальному часі було розроблено відповідне програмне забезпечення. На рис. 2.8 наведено робоче вікно програми *astro\_v2b* [113].

Спектроаналізатор DSP-Z має три робочих режими – *всехвильовий* режим (“*waveform*”), при якому АЦП дискретизує та записує на жорсткий диск ПК весь сигнал, який надходить з антенної системи, «*спектральний*» режим, при якому в FPGA-платі відбувається спектральна обробка даних шляхом FFT та на диск ПК записуються спектри потужності з двох антен («Північ – Південь» та «Захід – Схід»), а також *кореляційний* режим, при якому на додачу до двох вищевказаних спектрів потужності зі спектрального режиму записуються ще два масиви даних – амплітудний та фазовий крос-спектри.



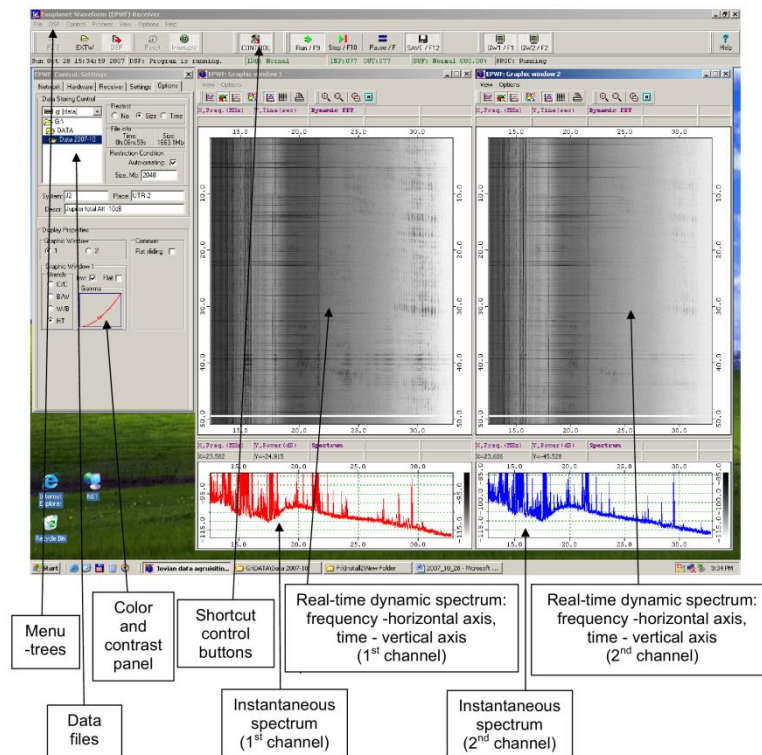


Рис. 2.8. Зовнішній вигляд робочого вікна програми керування та контролю роботи радіоспектроаналізатора DSP-Z *astro\_v2b*. Рисунок взятий з роботи [113].

Режим “waveform” дозволяє отримати максимум інформації та апаратно реалізувати будь-яку часову та частотну роздільну здатність. Використання такого режиму для досліджень низькочастотних РРЛ дасть змогу досліджувати профілі ліній з дуже високою частотною роздільною здатністю та відшукувати вкрай слабкі та вузькі компоненти радіальної швидкості. Але, разом з тим, при такому режимі дуже велика швидкість запису даних ( $\sim 264$  МБ/с), яка призводить до того, що одна година запису сигналу у режимі “waveform” дасть більше 500 Гб даних, час на обробку яких буде значно вищим, ніж для спектрального і кореляційного режимів (швидкість запису  $\sim 327$  кб/с та  $\sim 654$  кб/с відповідно). Також проблемою є зберігання такої великої кількості даних.

Більш оптимальними режимами DSP-Z для цілей спектроскопії є спектральний та кореляційний режими. Після надходження сигналу з антенної системи у приймач виконується віконне перетворення Фур’є, що конвертує вхідний сигнал  $x(t)$  у двомірну спектрограму «час – частота»  $A(t, f)$ , яку також

називають динамічним спектром. Функція  $A(t, f)$  відображає середню спектральну густину потоку, обробленого віконним перетворенням Фур'є сигналу [113]:

$$A(t, f) = |X(t, f)|^2, \quad (2.1)$$

де

$$X(t, f) = \frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} x(\tau) g(\tau - t) e^{-i2\pi f \tau} d\tau, \quad (2.2)$$

де  $g(t - \tau)$  – функція вікна, яка використовується для розбивки нестационарних даних на квазістационарні сегменти. Якщо обрано звужену форму функції вікна, це дозволить ефективно знижувати вплив паразитних ефектів, обумовлених проникненням вузькосмугових (широкосмугових) сигналів та імпульсних радіозавад через бічні пелюстки. Параметр  $T$  визначає довжину вікна аналізу, що ковзає по осі часу, параметр  $t$  відповідає положенню центра вікна у часі.

DSP-Z виконує розрахунки, наведені у (2.1) та (2.2), наступним чином. Вхідний сигнал шифрується з частотою дискретизації в АЦП  $f_s$  (час дискретизації  $\Delta t_s = 1/f_s$ ). Ключовим параметром FPGA-плати, що використовується для розрахунку спектрів, є довжина  $N_w$  сегменту даних (вікна), які послідовно обробляються при розрахунку спектрограм. Оскільки FFT використовується при оцінці спектрів, розмір вікна  $N_w$  зазвичай обирається цілим як показник ступеню з основою 2, тобто  $N_w = 2^m$ . Цей параметр визначає тривалість часового вікна  $T = N_w \Delta t_s$ . Розмір вікна визначає відстань між двома сусідніми FFT-частотними каналами у спектрограмі через формулу  $\Delta f = \frac{f_s}{N_w}$ , що дає значення найвищої можливої частотної роздільної здатності, яке у спектральному та кореляційному режимах дорівнює близько 4 кГц. Часова роздільна здатність також може бути розрахована у залежності від розміру вікна, вона може бути обмежена умовою  $\Delta t \geq \frac{1}{\Delta f}$ . Це означає, що завжди приблизно виконується рівняння  $\Delta t \times \Delta f \cong 1$ , яке накладає обмеження на один параметр, якщо інший вже обрано [113].

Результуюча спектрограма являє собою двомірний масив значень спектральної потужності  $A(t_k, f_j)$ , що повідліково розташовані на частотно-часовій сітці, яка задається значенням частотної та часової роздільної здатності, тобто

$t_k = t_0 + k\Delta t, f_j = j\Delta f, j = 0, 1, 2, \dots, \frac{N_w}{2} - 1$ . У принципі, можна досягти більш високої роздільної здатності шляхом зниження значень  $\Delta f$  та  $\Delta t$ , однак це впирається на вищевказану обмежувальну умову ( $\Delta t \times \Delta f \cong 1$ ).

Також слід розглянути два важливі моменти. По-перше, якщо обрано функцію згладжування вікна  $g(\tau - f)$ , прогалини в даних проявляються на краях вікна, що призводить до зменшеної потужності сигналу та погіршення відношення сигнал/шум. По-друге, значення спектрограм, розраховані безпосередньо за формулою (2.2), є статистично неузгодженими у тому сенсі, що дисперсія спектральної потужності не зникає, коли довжина вікна наближається до безкінечності [113]. Загальноприйнятою практикою для вирішення цих двох вищеназваних проблем є використання вікон даних з перекриттям та усереднення багатьох послідовних сегментів даних. Велике перекриття між послідовними вікнами збільшує ефект усереднення та зменшує втрати даних на краях вікон, але збільшує апаратні затрати на додаткові обчислювання. Компромісом слугує 50%-перекриття, що призводить лише до погіршення відношення сигнал/шум на 1%. Однак, згладження відбувається за рахунок зменшення часової роздільної здатності. Процедура усереднення у часі  $N_a$  сусідніх спектрів потребує введення додаткового параметру  $\Delta t_a$ , який визначає часову роздільну здатність згладжених спектрограм  $\Delta t_a = N_a \Delta t$ .

У спектральному режимі два вхідні сигнали обробляються незалежно один від одного, що дає два незалежних потоки даних. В кореляційному режимі навпаки – два вхідних сигнали конвертуються у єдиний масив – значення когерентності між двома вхідними сигналами. Когерентність, що залежить від часу і частоти, можна використовувати у випадках, коли це необхідно, наприклад, у зменшенні впливу ефекту плутанини сигналів при спостереженнях у багатопробієвих режимах.

Функція когерентності  $C(t, f)$  представляється на частотно-часовій площині у вигляді крос-спектру двох вхідних сигналів  $x(\tau)$  [113]:

$$C(t, f) = |\langle X_1(t, f) X_2^*(t, f) \rangle|, \quad (2.3)$$

де спектри  $X_{1,2}(t, f)$  розраховуються відповідно (2.2), а  $*$  означає операцію комплексного спряження. По аналогії зі спектральним режимом, результат операції над двома спектрами розраховується у деяких послідовних вікнах часу, що перекриваються, усереднення яких дасть згладжену оцінку функції когерентності  $C(t, f)$ . Як і для спектрограм, розраховується набір дискретних значень, що визначаються відстанню між каналами по частоті  $\Delta f$  та часовою роздільною здатністю  $\Delta t_a$ . Однак слід відзначити, що на відміну від спектрального режиму абсолютне значення в (2.3) оцінюється після усереднення комплексної величини  $X_1(t, f) * X_2(t, f)$  по  $N_a$  послідовним вікнам. Також концептуальною різницею між спектральним і кореляційним режимом є те, що в останньому ефективно придушення паразитних компонентів відбувається лише в одному з двох каналів. Це придушення є результатом усереднення зі сталою часу  $\Delta t_a$ , що використовується у згладжуванні при оцінці когерентності.

Кореляційний режим допоможе у дослідженні в низькочастотних РРЛ компонентів середовища з вкрай малими кутівими розмірами (клампів) або дискретних радіоджерел (слід нагадати, що на УТР-2 за допомогою амплітудних крос-спектрів можна апаратно здійснити перемноження ДН антен «Північ – Південь» і «Захід – Схід», що дасть синтезовану «олівцеву» діаграму шириною приблизно в  $0.5^\circ$ ).

Дані після обробки FPGA-платою записуються на ПК у вигляді файлів формату “*.jds*”. Вибір об’єму записуваних файлів, як й інші параметри спостережень (режим спостережень, часову роздільну здатність, смугу аналізу, зміну параметрів відображення) можна здійснити у робочому вікні програми *astro\_v2b* перед початком запису даних. У заголовку кожного *.jds*-файлу міститься інформація про всі основні характеристики приймача DSP-Z в момент запису файлу (у тому числі точні дату та час початку запису). Виходячи з особливостей обраного протоколу, для подальшої обробки дані формату *.jds* необхідно конвертувати до стандартного формату з плаваючою комою (*float*).

Спектроаналізатор DSP-Z, виходячи з його конструктивної частоти дискретизації, може забезпечити проведення радіоспектроскопічних досліджень з

високою роздільною здатністю. Як було зазначено вище, для такого типу досліджень оптимальними будуть спектральний та кореляційний режими. Частотна роздільна здатність в 4 кГц може бути оптимальною при оглядових радіоспектроскопічних дослідженнях великомасштабних структур Галактики, але не є достатньою для здійснення, наприклад, прецизійного аналізу профілів РРЛ. Покращити частотну роздільну здатність можна шляхом зменшення частоти дискретизації та відповідного звуження смуги аналізу (при  $f_s = 66$  МГц смуга аналізу 8.25 – 33 МГц,  $\Delta f = 4$  кГц, при  $f_s = 33$  МГц смуга аналізу 16.5– 33 МГц,  $\Delta f = 2$  кГц і т.д.). Покращення частотної роздільної здатності хоча б до 2 кГц дозволить більш точно аналізувати профілі ліній, ідентифікувати широкі крила РРЛ, що зливаються з базовою лінією при значному розширенні тиском та випромінюванням, проводити уточнення радіальних швидкостей областей С II. Широка смуга аналізу дозволяє одночасно спостерігати велику кількість РРЛ, частоти яких потрапляють у робочий діапазон частот спектроаналізатора. Нагадаємо, що відстані між сусідніми РРЛ скорочуються із зменшенням частоти, тому в діапазон 8.25 – 33 МГц потрапляє більше 200 тільки  $\alpha$ -РРЛ вуглецю. Усереднення такої великої кількості одночасно спостережуваних ліній призведе до значного покращення чутливості вимірювань (див. підрозділ 2.1).

РРЛ можна розглядати як сталий у часі процес, тому для їх спостережень, в принципі, не потрібна висока часова роздільна здатність. Усереднення вікон з часом  $\Delta t_a$  в каналах, що припадають на частоти РРЛ, тільки допоможе у підвищенні відношення сигнал/шум і кращим чином вплине на загальну чутливість. Оптимальним з огляду на час подальшої обробки даних РРЛ є часова роздільна здатність 100 мілісекунд (10 спектрів за секунду).

Таким чином, використання при радіоспектроскопічних дослідженнях на УТР-2 цифрових спектроаналізаторів DSP-Z з великою смугою аналізу та великим динамічним діапазоном значно підвищить рівень досліджень, виведе їх на новий рівень чутливості вимірювань і завадостійкості, та дозволить виконувати реєстрацію вкрай слабких РРЛ. Якщо реалізувати ефективний час накопичення  $\Delta t = 100$  годин при очікуваній ширині РРЛ в Галактиці на частотах нижче 30 МГц

$\Delta f \approx 4$  кГц, можна зареєструвати РРЛ з мінімальною можливою відносною інтенсивністю  $\varepsilon$  [114]:

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

У разі реалізації  $\Delta t = 500$  годин  $\varepsilon = 1.2 \cdot 10^{-5}$ , а у 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. Тому використання DSP-Z при спостереженнях на УТР-2 дає шанс вивести дослідження РРЛ на високий якісний та кількісний рівні.

#### **2.4. Програмне забезпечення для обробки отриманих радіоспектроскопічних даних**

Як було вказано вище, досліджувані на УТР-2 низькочастотні РРЛ вуглецю мають вкрай слабкі інтенсивності відносно континууму. Виходячи з цього факту, реєстрація ліній у спостережних спектрах можлива лише внаслідок здійснення багаторівневої обробки даних. Для обробки даних, отриманих за допомогою ЦК, використовується комплекс відповідних алгоритмів програмного забезпечення, розроблений С. В. Степкіним [31].

Дані, отримані за допомогою ЦК, записуються на ПК періодами  $T$ , які відповідають часу накопичення у кожному каналі  $m$  автокореляційної функції (АКФ) сигналу  $R(mT)$ . Зазвичай цей період приймають таким, що дорівнює чотирьом хвилинам, що є оптимальним виходячи із заводової ситуації та задля зменшення втрат корисних даних. На першому етапі обробки даних, отриманих за допомогою ЦК, записи періодів АКФ за весь сеанс спостережень аналізуються на наявність потужних широкосмугових завод. Періоди з чистими даними усереднюються, після чого з усередненого спектру АКФ видаляються вузькосмугові та низькоінтенсивні заводи. Здійснюється це шляхом віднімання з АКФ моделі функції заводи, яка описується виразом

$$R[i] = \frac{2A}{r_1} \exp\left(-\sqrt{\frac{i\pi\Delta f}{(2\ln 2)^2 f_s}}\right) \cos\left(2\pi(f_G - f) \frac{i-1}{f_s}\right),$$

де  $A$  – амплітуда завади,  $r_1$  – кількість точок АКФ,  $\Delta f$  – ширина завади,  $f_s$  – частота дискретизації досліджуваного сигналу,  $f_G$  – частота гетеродину широкосмугового радіоприймача.

При спостереженнях у напрямку потужного континуального радіоджерела (наприклад, Cas A) вузькосмугових завад в усередненому спектрі АКФ зазвичай не більше 10 у смузі аналізу близько 1.2 МГц. У разі спостережень у напрямку областей Галактики, де відсутні потужні континуальні джерела, і досліджувані області спостерігаються відносно розподіленого нетеплового галактичного фонового радіовипромінювання, завад у спектрі значно більше (більше 30). Також кількість завад у спектрі більшає в залежності від напрямку наведення радіотелескопа ( $\pm 2^h$  від кульмінації).

Програмне забезпечення для обробки радіоспектроскопічних даних було підготоване за допомогою середовища Borland Delphi 7. На рис. 2.9 наведено спектр усередненої АКФ, отриманий 21 жовтня 2019 року у смузі 23.39 – 24.65 МГц за допомогою ЦК у напрямку Cas A. У спектрі присутні численні вузькосмугові завади.

На рис. 2.10 наведено процедуру видалення вузькосмугової завади із усередненого спектру АКФ.

Очищений спектр з видаленими завадами піддається процедурі видалення базової лінії. Ця процедура необхідна для отримання спектрів РРЛ без впливу амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) телескопу та каскадів підсилення сигналу як в антенній системі УТР-2, так і підсилювачами у самому ЦК (див. рис. 2.2). Дану процедуру було реалізовано за допомогою бібліотек MATLAB. Процедура полягала у створенні моделі усередненої АКФ на основі сплайнової інтерполяції шляхом вписування в АКФ полінома високого ступеню (не менше 3). Для максимального відтворення моделлю спектру АКФ, для інтерполяції обирається максимально можлива кількість відрізків (рис. 2.11). Слід зазначити,

що задля зменшення впливу процедури інтерполяції на профілі РРЛ та задля їх відтворення без змін в амплітуді, при побудові моделі не враховуються канали АКФ, що припадають на частоти РРЛ. Після цього з усередненого спектру АКФ віднімається його модель, результат чого можна побачити на рис. 2.11 (другий знизу). Далі модель нормується відносно максимального значення, після чого отриманий спектр з нульовою базовою лінією ділиться на нормовану модель, що дає підсумковий нормований спектр з серією РРЛ без інструментального впливу (рис. 2.11 знизу).

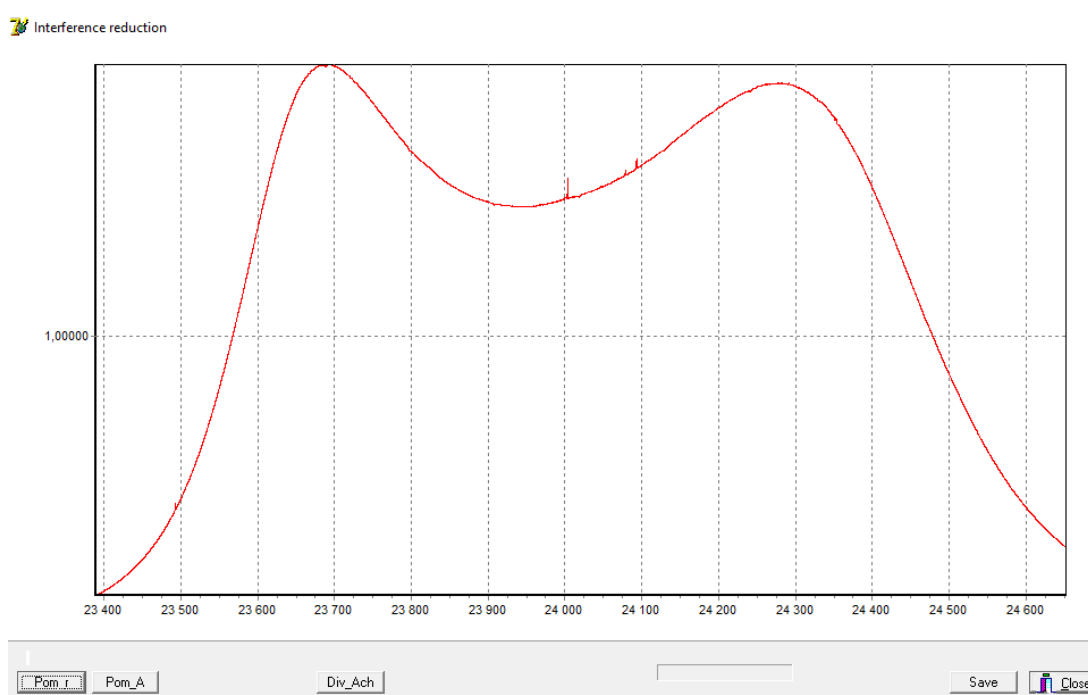


Рис. 2.9. Спектр усередненої АКФ сигналу, отриманий за допомогою ЦК 21 жовтня 2019 року у напрямку Cas A у смузі 23.39 – 24.65 МГц. Ефективний час накопичення приблизно 7 годин. Програмне забезпечення реалізоване в середовищі Borland Delphi 7.





Рис. 2.10. Видалення вузькосмугової завади в усередненому спектрі АКФ. *Зверху* – зумована частина спектру, що містить вузькосмугову заваду близько частоти 24 МГц; *Всередині* – модель завади з відповідною амплітудою та шириною; *Знизу* – зумована частина спектру після видалення завади близько частоти 24 МГц.

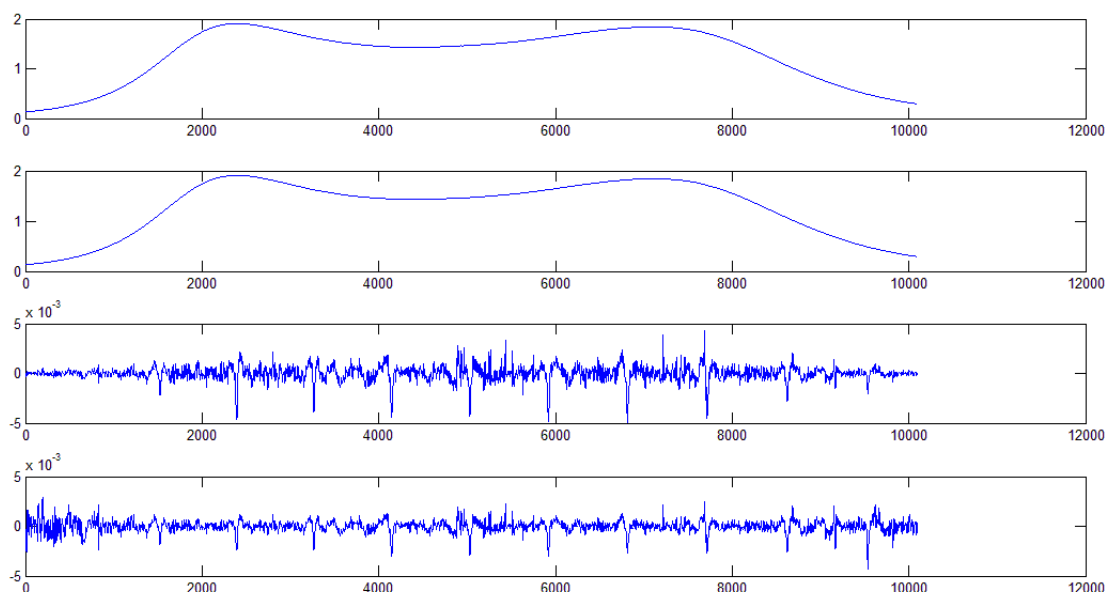


Рис. 2.11. Процедура видалення базової лінії за допомогою бібліотек MATLAB. *Перший згорі* – спектр усередненої АКФ; *Другий згорі* – побудована шляхом сплайнової інтерполяції модель АЧХ; *Другий знизу* – підсумковий ненормований спектр серії РРЛ; *Знизу* – підсумковий нормований спектр серії РРЛ.

Як було вказано вище, зі зменшенням частоти відстань між сусідніми РРЛ зменшується, лінії у спектрі «згущуються». Відстань по частоті між двома сусідніми лініями визначається за формулою  $\Delta\nu \approx \frac{6RcZ^2\Delta n}{n^4} \approx \frac{3\nu}{n}$ , де  $c$  – швидкість світла,  $Z$  – ефективний заряд ядра,  $R$  – стала Рідберга для вуглецю,  $n$  – головне квантове число. У випадку декаметрових РРЛ, коли головні квантові числа досліджуваних міжзоряних атомів набагато більше порядку переходів, що спостерігаються ( $\Delta l = 1 \dots 5$ ) і якщо точно відомі частоти таких переходів, можна розглядати профілі великої кількості близьких ліній як еквівалентні та усереднювати їх. Цим можна в  $N$  разів збільшити час накопичення і, відповідно, в  $\sqrt{N}$  разів збільшити чутливість вимірювань (де  $N$  – кількість усереднених ліній), що при спостереженнях слабких РРЛ вкрай важливо.

На рис. 2.12 наведено усереднений спектр серії РРЛ вуглецю C644 $\alpha$  – C654 $\alpha$ , отриманий у напрямку Cas A шляхом усереднення ліній C644 $\alpha$  – C654 $\alpha$  у

смугі аналізу 1.2 МГц відносно центральної частоти 24 МГц з урахуванням доплерівського зсуву частот ліній.

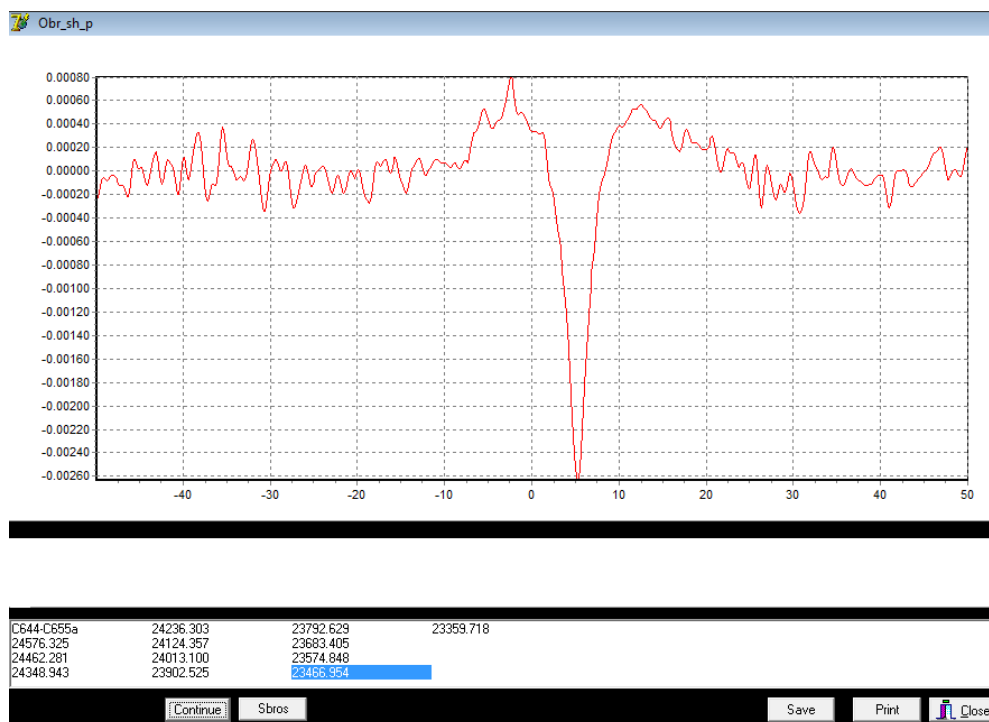


Рис. 2.12. Спектр усередненої серії РРЛ вуглецю C644 $\alpha$  – C654 $\alpha$ , отриманий у напрямку Cas A. Усереднено 11 РРЛ у смугі аналізу. По осі абсцис – відносні частоти, лінія зсунута приблизно на 4 кГц (приблизно на –48 км/с, що передбачає область формування ліній у відгалудженні Персея). Ефективний час накопичення приблизно 7 годин, еквівалентний час накопичення  $11 \times 7 =$  приблизно 77 годин.

Цифрові спектроаналізатори DSP-Z при їх використанні на УТР-2 мають максимальну смугу аналізу 24 МГц, що робить їх застосування вкрай важливим при радіоспектроскопічних дослідженнях. Розглянемо процедуру обробки даних РРЛ при їх спостереженнях на УТР-2 за допомогою DSP-Z на прикладі спектрального режиму роботи.

Як було зазначено вище, дані з DSP-Z записуються на жорсткий диск ПК у вигляді файлів регульованого розміру у форматі “.jds”. Кожний файл формату .jds має заголовок, який несе в собі технічну інформацію про характеристики приймача під час запису, дату та точний час початку запису файлу. Заголовок має розмір 1024 байти та має наступну структуру:

32 байти *muny string*: назва файлу у форматі *ddmmpp.ggxxcc.jds*

32 байти *muny string*: дата і час запису файлу у форматі *Mon Oct 21 21:00:03 2019*

32 байти *muny string*: час UT створення файлу

32 байти *muny string*: ім'я оператора або номер приймача (на УТР-2 від А до Е)

32 байти *muny SYSTEMTIME*: системний час створення файлу

96 байти *muny string*: місце розташування обсерваторії

256 байти *muny string*: дескриптор (додаткова інформація, введена оператором)

16 байтів *muny DWORD* (по 4 біти *muny int*): сервісні параметри, збережені у форматі PP

112 байтів *muny DWORD* (по 4 біти *muny int*): сервісні параметри, збережені у форматі DSPP.

Сервісні параметри, збережені у форматах PP та DSPP, включають в себе інформацію щодо частоти дискретизації, виду синхронізації приймача (від GPS або внутрішню), режиму роботи DSP-Z (waveform, спектральний або кореляційний), режиму запису каналів у спектральному та кореляційному режимах, обраної оператором частотний діапазон приймача, нижньої та верхньої межі цього діапазону у частотних каналах, часової роздільної здатності, децимації та усереднення, вибору вікон вагової функції. Нижче наведено інформацію, зчитану із заголовку файлу за допомогою програми, створеної за допомогою Borland Delphi 7 для *.jds*-файлу, отриманому при спостереженнях у напрямку Cas A:

```

E211019_180003.jds
Mon Oct 21 21:00:03 2019
2019-10-21_18:00:03
E
UTR-2, Kharkov, Ukraine
RRLs_CasA
Clock freq 66000000Hz
synch 0
mode 2
Wch 0
Smd 0
Offt 3
Lb 2048

```

*Hb* 8192  
*Wb* 6144  
*Navr* 806  
*Cavr* 0  
*Weigt* 0  
*DC compensation* 0  
*External CLC* 1  
*Channel A* 0  
*Channel B* 0  
*ExtWindow* 0

Починаючи з 1025 байту у файлі розташовані дані у вигляді блоків, що мають вигляд двомірного масиву ( $[i, j]$ ), де  $i$  – канал А (антена «Північ – Південь» або В (антена «Захід – Схід»,  $j$  – номер відліку) слів розміром 2 байти; два слова для спектрального режиму складають один відлік розміром 4 байти. Один блок складається із 8190 відліків, останні два відліки несуть службову інформацію щодо фази та секунди у добі від початку запису блоку.

Як було зазначено вище, виходячи з використовуваного протоколу запису файлів *.jds*, для подальшої обробки та аналізу даних необхідно конвертувати дані з формату *.jds* у звичайний формат з плаваючою комою *float* за допомогою перетворення (наведено приклад на мові програмування C):

```

float SNrm = 4*2*1024.0/4294967296.0/Navr; /* scaling */
int expn = (SSAMPLE&0x1f); /* exponent */
unsigned int mant = (SSAMPLE&0xFFFFFC0); /* mantissa */
float FLOAT_NUM = (float)(mant)/pow(2., expn)/Snrm;
  
```

де *Navr* – часова роздільна здатність, *SSAMPLE* – слово у відліку.

Принцип обробки радіоспектроскопічних даних, отриманих за допомогою DSP-Z побудований практично за таким же принципом, що й даних, отриманих за допомогою ЦК. Після виконання вищевказаної конвертації на першому етапі аналізуються усі блоки даних у файлі *.jds*. Блоки із широкосмуговими завадами або потрапившими до широкої смуги аналізу інтермодуляціями або стоячими хвилями виключаються з аналізу. Відповідно, чисті блоки даних усереднюються з урахуванням вагової функції. На рис. 2.13 наведено приклад спектру у смузі

8 – 32 МГц, що складається з 1220 усереднених блоків (три файли). Відповідно, час накопичення складає приблизно 100 хвилин (1220 блоків  $\times$  5 секунд (час одного блоку)).

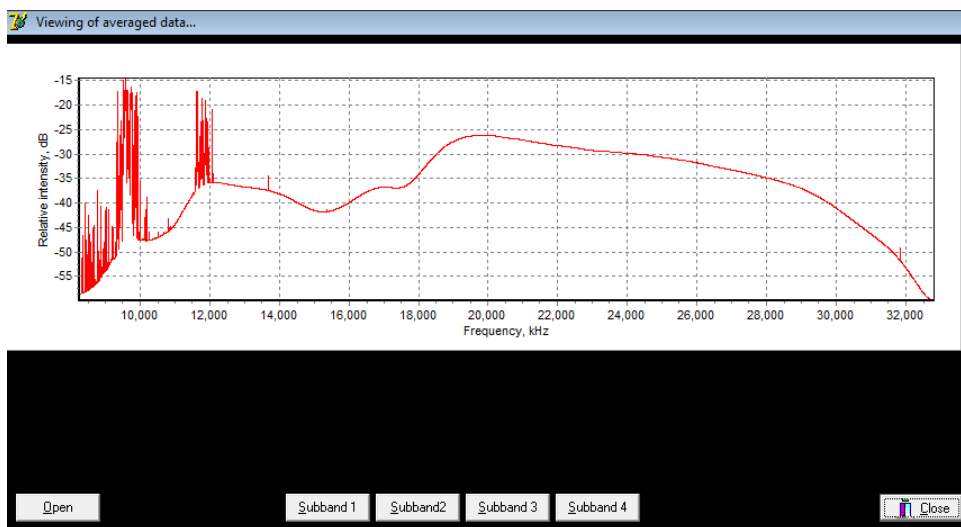


Рис. 2.13. Спектр усереднених чистих блоків каналу А (антена «Північ – Південь»).

Після цього, за аналогією операцій з даними, отриманими на ЦК, здійснюється видалення вузькосмугових завад у спектрах для каналів А і В. Зазвичай, видалення завад здійснюється в обраних підсмугах (рис. 2.14). При запису даних на DSP-Z не розраховується АКФ, тому видалення завад здійснюється заміною значень частотних каналів, які припадають на заваду, на середні значення між чистими сусідніми каналами з обох сторін від завади.

Далі очищений спектр піддається сплайновій інтерполяції для створення моделі АЧХ спектру. При цьому обирається велика кількість відрізків сплайнів (наприклад, для підсмуги 20 – 30 МГц – не менше 700 відрізків). За такою ж процедурою, як і для ЦК (рис. 2.11) отримується підсумковий нормований спектр з нульовою базовою лінією без впливу континуального випромінювання та як системи підсилювання антенної системи, так і підсилювання безпосередньо у блоках на входах приймачів DSP-Z (рис. 2.15).

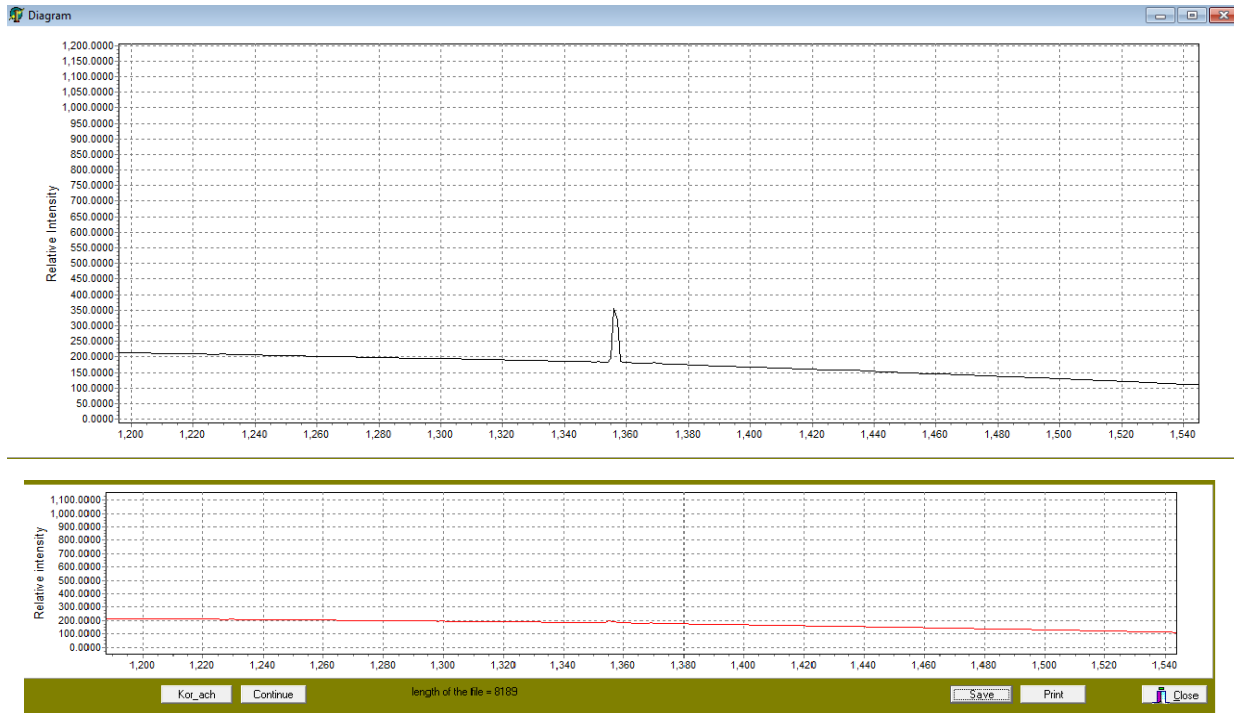


Рис. 2.14. Зверху – підсмуга із завадою між частотними каналами 1355 і 1360 (13.67 – 13.69 МГц); Знизу – підсмуга між частотними каналами 1355 і 1360 (13.67 – 13.69 МГц) після видалення завади.

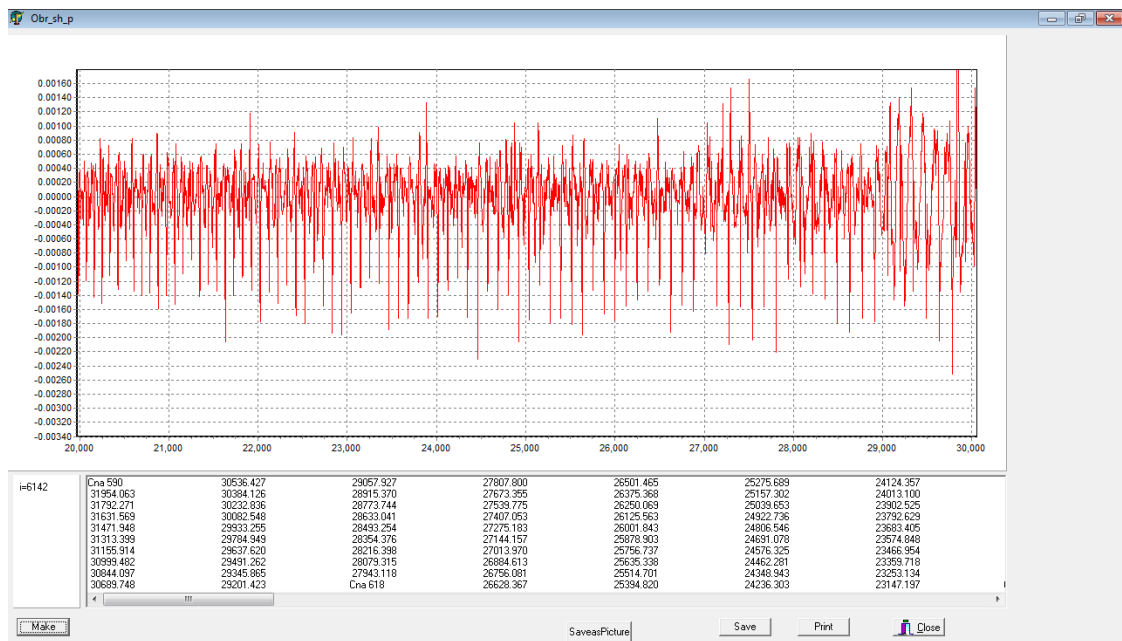


Рис. 2.15. Підсумковий нормований спектр, що має більше 100 РРЛ вуглецю у смузі 20 – 30 МГц, отриманий 21 жовтня 2019 року у напрямку Cas A. Ефективний час накопичення приблизно 100 хвилин.

Слід зазначити, що при усередненні великої кількості ліній (більше 20) слід враховувати зміну доплерівського зсуву частот ліній на різних частотах задля отримання коректних значень частот РРЛ та задля запобігання зменшення похибки в отриманій після усереднення ширині РРЛ (якщо не враховувати точний доплерівський зсув – ширина лінії не буде відповідати реальній, яка обумовлюється комбінацією фізичних умов в областях С II).

Вищеописані процедури обробки радіоспектроскопічних даних доказали свою ефективність, яка обумовлена їх багаторівневістю та точними методами видалення завад й інструментального відклику. Все це дозволяє отримувати дані РРЛ вуглецю з вкрай високою чутливістю. Це дає змогу проводити дослідження у напрямках областей Галактики, де відсутнє потужне континуальне випромінювання. Можливість вибору підсмуг в умовах складної заводової обстановки також дозволяє отримувати дані у відносно чистих проміжках частотних каналів.

## 2.5. Методи радіоспектроскопії на УТР-2

У підрозділі 2.1 було зазначено, що дослідження вкрай слабких РРЛ ускладнені багатьма факторами (високі яскравісні температури нетеплового галактичного тла, високий рівень завад). Тому для їх спостережень суворі вимоги пред'являються до приймальної та реєструючої систем радіотелескопа (підрозділи 2.1 – 2.3). У даному підрозділі будуть обговорені методи радіоспектроскопії на УТР-2.

В основі методів радіоспектроскопії ключове значення мають підвищення чутливості та боротьба із завадами.

Значне підвищення чутливості при дослідженнях низькочастотних РРЛ вуглецю, що мають відносні інтенсивності порядку  $10^{-3} - 10^{-4}$ , стало можливим при впровадженні на радіотелескопі УТР-2 спектроаналізаторів DSP-Z, що мають смугу аналізу шириною 24 МГц. Раніше неодноразово було сказано про те, що відстань між сусідніми РРЛ скорочується із зменшенням частоти ( $\Delta f \sim 3f / n$ ),



відповідно, до смуги аналізу 8 – 32 МГц потрапляють частоти близько 250 РРЛ вуглецю. Усереднення 250 РРЛ дасть збільшення чутливості в  $\sqrt{250} \approx 15$  разів, що багатократно зменшить некорельовані шуми за межами профілю лінії та дозволить провести аналіз їх основних характеристик – інтенсивності та ширини.

Важливе значення для чутливості при радіоспектроскопічних дослідженнях має частотна роздільна здатність реєструючого приймача. ЦК мали змогу реалізувати частотну роздільну здатність аж до 0.1 кГц, але разом із цим існували труднощі, пов'язані з малим динамічним діапазоном та однобітовим квантуванням таких пристроїв. DSP-Z має динамічний діапазон 74 дБ та широку смугу аналізу. У режимі “waveform”, як було зазначено вище, можливо реалізувати вкрай високу частотну роздільну здатність, але це пов'язано із значними затратами часу на обробку таких даних і проблемою із зберіганням вкрай великих об'ємів даних. Цих недоліків позбавлені спектральний та кореляційний режими, але частотна роздільна здатність у цих режимах складає лише 4 кГц, чого недостатньо для чутливого аналізу профілів ліній (наприклад, для аналізу даних у напрямку Cas A задля визначення механізмів розширення ліній та коректні дослідження широких крил РРЛ вуглецю на вкрай низьких частотах, а також у ліній вищих порядків). Проте, для РРЛ у різних напрямках галактичної площини та за її межами більш важливим є дослідження просторового розподілу цих ліній, ніж прецизійний аналіз їх профілів. Лінії в межах та за межами галактичної площини мають ширини близько 4 кГц, що співпадає з частотною роздільною здатністю DSP-Z у спектральному та кореляційному режимах. Відповідно, навіть така частотна роздільна здатність цілком достатня для реалізації високочутливих спостережень. Існує також апаратна можливість покращити значення частотної роздільної здатності шляхом зменшення частоти дискретизації та відповідного звуження смуги аналізу за умовою Котельникова – Найквіста.

У рамках підвищення чутливості вимірювань також слід брати до уваги основні параметри радіотелескопа, такі як багатопроменевість, ширина ДН як усієї антени, так і окремих підрешіток/секцій, гнучкість у виборі структури

антени для заданого виду спостережень. Для радіоспектроскопії на УТР-2 при використанні багатолінійних (усереднення великої кількості одночасно спостережуваних ліній), багатопроменевих, багатосекційних методів спостережень можливо багатократно збільшити чутливість вимірювань.

При дослідженні протяжних областей Галактики в низькочастотних РРЛ можна використати метод багатопроменевих спостережень, де ДН буде розділена на п'ять «ножових» променів розміром  $\alpha \times \delta = 12^\circ \times 20'$ , які рознесені приблизно на  $0.5^\circ$  по схиленню один від одного. Відповідно, п'ять променів у просторовому відношенні еквівалентні ДН  $\alpha \times \delta = 12^\circ \times 2.5^\circ$ . Усереднення даних з усіх п'яти променів підвищить чутливість вимірювань більш ніж у 2 рази.

Також протяжні ділянки середовища можна спостерігати на окремих секціях УТР-2 (8 секцій в антені «Північ – Південь» з розміром ДН  $\alpha \times \delta = 12^\circ \times 4^\circ$  та 4 секції в антені «Захід – Схід» з розміром ДН  $\alpha \times \delta = 3^\circ \times 12^\circ$ ). Усереднення даних, отриманих на усіх 12 секціях призведе до підвищення чутливості вимірювань у 3.5 рази.

На антенних решітках з двополяризаційними вібраторами (наприклад, УРАН-1...4, ГУРТ) усереднення даних, отриманих для кожної окремої поляризації, призведе до підвищення чутливості в 1.4 рази.

Максимальний ККД антени та максимальна ефективна площа спостерігаються при орієнтації ДН у зеніт. При відхиленні ДН від зеніту зменшується і ККД, і ефективна площа, що також впливає на чутливість вимірювань (про це йтиме мова у розділах 4 і 5).

Все це дає змогу в десятки й сотні разів збільшити чутливість вимірювань, особливо при спільних скоординованих спостереженнях на УТР-2 та на інших радіотелескопах – УРАН-2, ГУРТ, LOFAR, NenuFAR, MWA.

Завадостійкість та боротьба із завадами під час радіоспектроскопічних вимірювань не менш важливі, ніж підвищення чутливості. На радіотелескопі УТР-2 постійно вівся моніторинг завадової обстановки. В той час, як вдень радіозавади вкрай інтенсивні та майже унеможливають отримання

радіоспектроскопічних даних нижче частот 16 – 20 МГц, у нічні години у спектрі зазвичай присутня лише незначна кількість завад поблизу частот 10 та 12 МГц.

Завадова обстановка навколо Радіоастрономічної обсерваторії ім. С. Я. Брауде, де розташований УТР-2, вкрай мінлива, може значно відрізнятись у залежності від часу доби, дня тижня, сезону, року спостережень та від багатьох неприродних факторів, таких, як короткохвильові (КХ) радіостанції мовлення тощо. На рис. 2.16 і 2.17 наведено спектри завадової обстановки, отримані на антені «Північ – Південь» при зенітній орієнтації ДН 15 грудня 2015 року у різний час доби. Видно, що навіть вночі у спектрі є відносно інтенсивні завади, обумовлені роботою КХ станцій.

На рис. 2.18 і 2.19 наведено спектри, отримані 21 та 22 квітня 2020 року при тій самій орієнтації ДН антени. Видно, що завад набагато менше, ніж у 2015 році.

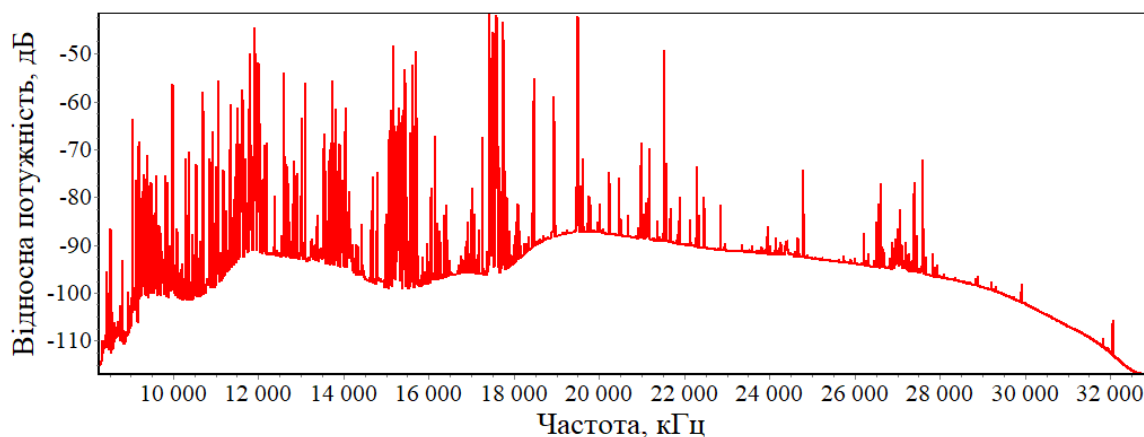


Рис. 2.16. Спектр завадової обстановки, отриманий на антені «Північ – Південь» радіотелескопу УТР-2 при зенітній орієнтації ДН 15.12.2015 року об 11:40 місцевого часу

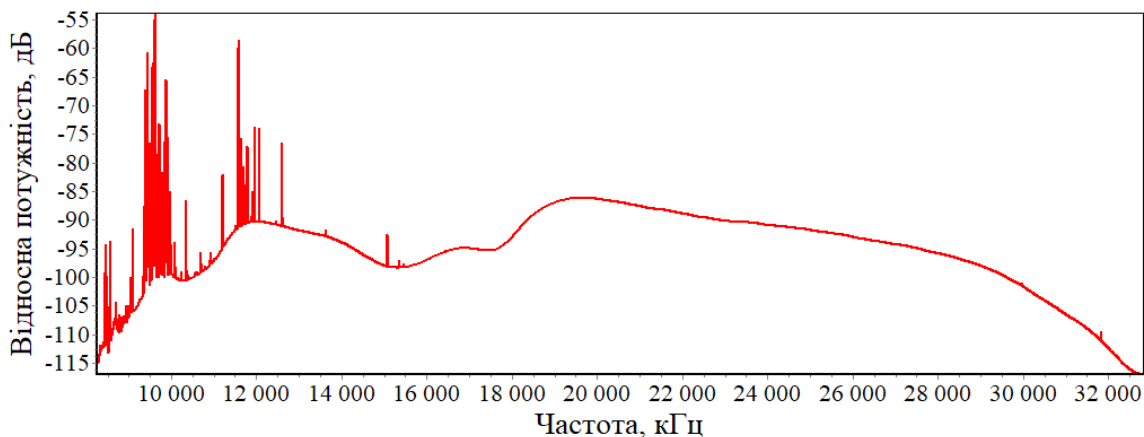


Рис. 2.17. Спектр заводої обстановки, отриманий на антені «Північ – Південь» радіотелескопу УТР-2 при зенітній орієнтації ДН 15.12.2015 року в 23:55 місцевого часу

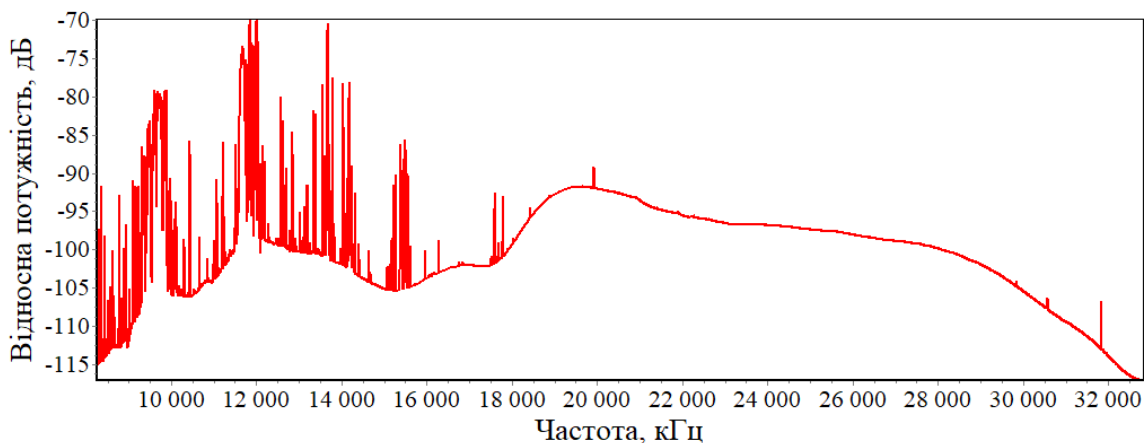


Рис. 2.18. Спектр заводої обстановки, отриманий на антені «Північ – Південь» радіотелескопу УТР-2 при зенітній орієнтації ДН 21.04.2020 року о 19:00 місцевого часу

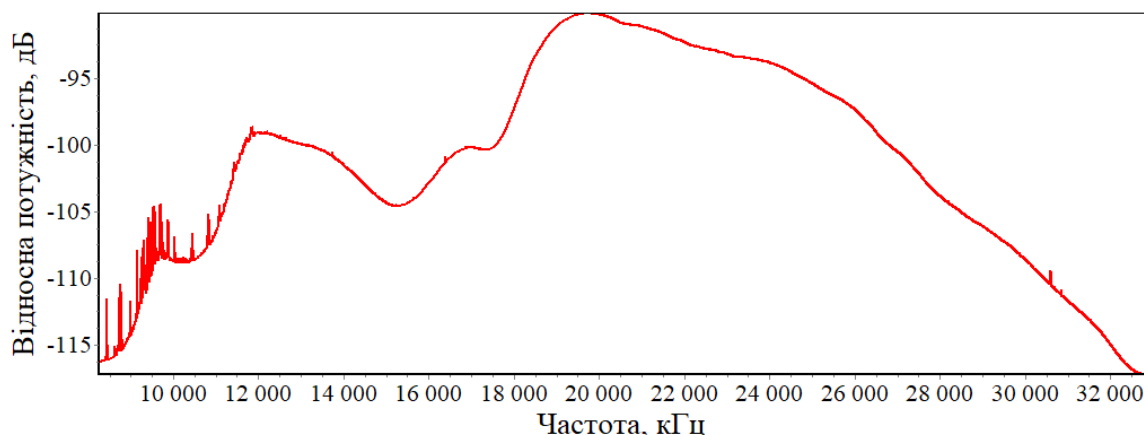


Рис. 2.19. Спектр заводої обстановки, отриманий на антені «Північ – Південь» радіотелескопу УТР-2 при зенітній орієнтації ДН 22.04.2020 року о 01:00 місцевого часу

Зміна заводої обстановки може залежати від періодів сонячної активності в межах одинадцятирічного сонячного циклу. В роки мінімуму заводої обстановки відносно краща, ніж в роки максимуму [115].

Слід відзначити, що з 2019 року на УТР-2 було розпочато довгострокову програму моніторингу радіозавад. Завади за своєю природою нестаціонарні, що залежить, як було сказано вище, від часу доби, дня тижня, сезону року, напрямку ДН і т.п. При великих відхиленнях від ДН від зеніту шлях випромінювання до антени крізь іоносферу зростає, що збільшує вплив загоризонтних КХ станцій а також від блискавок з екваторіальних широт (при відхиленні ДН у бік півдня). Також на результати вимірювань можуть впливати іскри у системі фазування радіотелескопа, а також у свічках запалення карбюраторних транспортних та інших засобів. Перші результати моніторингу завад показали, що їх рівень став у 10 разів менше, ніж 35-40 років тому (від часу проведення попереднього моніторингу за тою ж самою схемою). Це обумовлено прогресом у радіокомунікаційному обладнанні, а саме у фідерних комунікаціях (оптоволоконні кабелі), перенесення радіозв'язку на мовлення через супутники, перехід радіозв'язку на більш високі частоти [116].

Серед методів боротьби із завадами також слід зазначити їх селекцію за порою доби, напрямком прийому, виявлення та зменшення впливу внутрішньоапаратурних завад від різних вузлів, систем і комунікацій радіотелескопа. Важливо також проводити моніторинг стану іоносфери, особливо для декаметрового діапазону.

Усі вищеназвані методи підвищення чутливості і завадостійкості радіоспектроскопічних спостережень використовуються на УТР-2, що дозволяє значно розширити частотний діапазон досліджень та проводити широкомасштабні пошукові дослідження ділянок середовища, що лежать вдалині від потужних континуальних джерел та галактичної площини, що до цього моменту на декаметрових хвилях ще не проводилися.

## **2.6. Висновки по розділу 2**

Були розглянуті інструменти, засоби та методи експериментальних радіоспектроскопічних досліджень на радіотелескопі УТР-2. Було обґрунтовано той факт, що український радіотелескоп УТР-2, що має найбільшу серед декаметрових телескопів світу ефективну площину та чутливість, найкращим чином підходить для високочутливих та високоефективних досліджень низькочастотних РРЛ. Ще більші переваги можливі при використанні багатоканальних, багаторозрядних цифрових радіоспектроаналізаторів нового покоління DSP-Z, що мають смугу аналізу шириною аж до 24 МГц та великий динамічний діапазон. Виходячи з того факту, що низькочастотні РРЛ згущуються у спектрі із зменшенням частоти, можна усереднювати велику кількість одночасно спостережуваних ліній, що значно підвищить чутливість вимірювань. Були розглянуті принципи та режими роботи DSP-Z та шляхи їх найкращого застосування для досліджень РРЛ. Розроблені методики обробки даних та відповідне програмне забезпечення дозволяють максимально зменшувати інструментальний вплив та завади різної інтенсивності при отриманні профілів ліній. Також були наведені методи підвищення чутливості та боротьби із

завадами, що мають виключне значення при дослідженні таких вкрай слабких ефектів, як низькочастотні РРЛ.

Основні положення та результати розділу викладені у публікаціях автора [98, 106, 107, 32].

## РОЗДІЛ 3

### РАДІОСПЕКТРОСКОПІЯ ОБРАНИХ ОБ'ЄКТІВ ГАЛАКТИКИ В НИЗЬКОЧАСТОТНИХ РЕКОМБІНАЦІЙНИХ РАДІОЛІНІЯХ ВУГЛЕЦЮ

#### 3.1. Моделі міжзоряних об'єктів з іонізованим вуглецем на прикладі середовища у напрямку Cas A, вибір об'єктів спостережень

Із самого початку в інтерпретації спостережень РРЛ вуглецю в напрямку Cas A розглядалися дві моделі – так звані «холодна» і «тепла». Вибір між цими двома моделями вдалося зробити в результаті продовження спостережень РРЛ вуглецю, що проводились спочатку в метровому та декаметровому діапазонах, у бік більш коротких дециметрових хвиль. На цих хвилях інтенсивність ліній вуглецю залежить від температури області С II.

У моделі холодного газу лінії вуглецю очікувано утворюються у хмарах з  $T_e \sim 20$  К та  $N_e \sim 0.3$  см<sup>-3</sup>; іонізований вуглець у цьому випадку пов'язаний із молекулярними хмарами [117, 118]. У моделі теплого газу лінії вуглецю утворюються в хмарах з  $T_e \sim 35 - 100$  К та  $N_e \sim 0.05 - 0.15$  см<sup>-3</sup> [119, 52, 120, 54, 56, 121, 68, 69], і ці області можуть бути ототожнені з хмарами нейтрального гідрогену H I у Галактиці. У роботах [70, 71] за допомогою спостережень РРЛ на декаметрових і метрових хвилях були отримані значення  $T_e \sim 70 - 140$  К та  $N_e \sim 0.03 - 0.055$  см<sup>-3</sup>, проте автори роблять висновок про асоціацію областей формування ліній із поверхневими шарами CO молекулярних хмар (де вуглець іонізований, а гідроген знаходиться в молекулярній формі) у напрямку Cas A. Таку перевагу зв'язку вони зумовлюють тим, що проведене ними моделювання РРЛ вуглецю і гідрогену показало неможливість одночасного формування цих ліній у тому самому об'ємі газу. У моделі теплого газу при визначенні заселеностей високих квантових рівнів вуглецю відіграє значну роль механізм низькотемпературної диелектронної рекомбінації, який уперше було обговорено в роботі [14].



На рис. 3.1 показано порівняння вимірних та розрахункових значень відношення інтегральних інтенсивностей ліній вуглецю до континууму при різних  $n$  у напрямку Cas A. Результати вимірювань інтенсивності ліній C603 $\alpha$ , C611 $\alpha$ , C621 $\alpha$  та C640 $\alpha$  [120] скориговані відповідно до роботи [119]. Теоретичні криві були розраховані для трьох значень температури в 25, 50 і 75 К та електронних густин для кожної температури. Використані значення коефіцієнтів нерівноважності  $b_n$  та  $\beta_n$  для вуглецю, обчислені при врахуванні диелектронної рекомбінації [122]. Всі криві прив'язані до спостережень ліній C537 $\alpha$  – C540 $\alpha$ , де завдяки часу накопичення в 1224 години була досягнута мінімальна помилка вимірювань [123].

Як видно із рис. 3.1, найкраще узгодження між розрахунковими та вимірними значеннями отримано при  $T_e = 50$  К та  $N_e = 0.15$  см<sup>-3</sup>; при цьому  $EM_{CII} = 1.7 \cdot 10^{-2}$  пк · см<sup>-6</sup>. Критичними при виборі моделей виявилися вимірювання найбільш високочастотних ліній: C165 $\alpha$  – C166 $\alpha$  [53], C220 $\alpha$  [53], C270 $\alpha$  [124], C300 $\alpha$ , C303 $\alpha$ , C308 $\alpha$ , C310 $\alpha$  [121]. Вимірні значення інтенсивностей цих ліній практично виключають можливість холодної моделі. Важливо, що накладені на рис. 3.1 результати більш недавніх вимірювань у трьох частотних діапазонах при  $n \sim 205$ ,  $n \sim 225$  та  $n \sim 575$  [68] узгоджуються з отриманими раніше даними.

Значення електронної густини області C II у напрямку Cas A, отримане із зіставлення ширин та інтенсивностей РРЛ вуглецю, може бути завищеним. Це пов'язано з тим, що при розрахунку розширення випромінюванням до уваги бралось лише загальне фонове випромінювання Галактики  $I_{BG,R}$ , що на частоті 100 МГц еквівалентно випромінюванню сфери з температурою близько 1000 К і збільшується із зменшенням частоти пропорційно  $\nu^{-2.55}$ . У той же час при розташуванні хмари, в якій сформувалася область C II, поблизу Cas A, її випромінювання  $I_{CasA}$  також може робити помітний внесок у розширення РРЛ на низьких частотах. У цьому випадку зіткнення з електронами повинні відігравати меншу роль у розширенні спостережуваної лінії, і узгодження розрахункових і

вимірних значень ширини ліній буде досягатись при менших значеннях  $N_e$  [119, 68, 31].

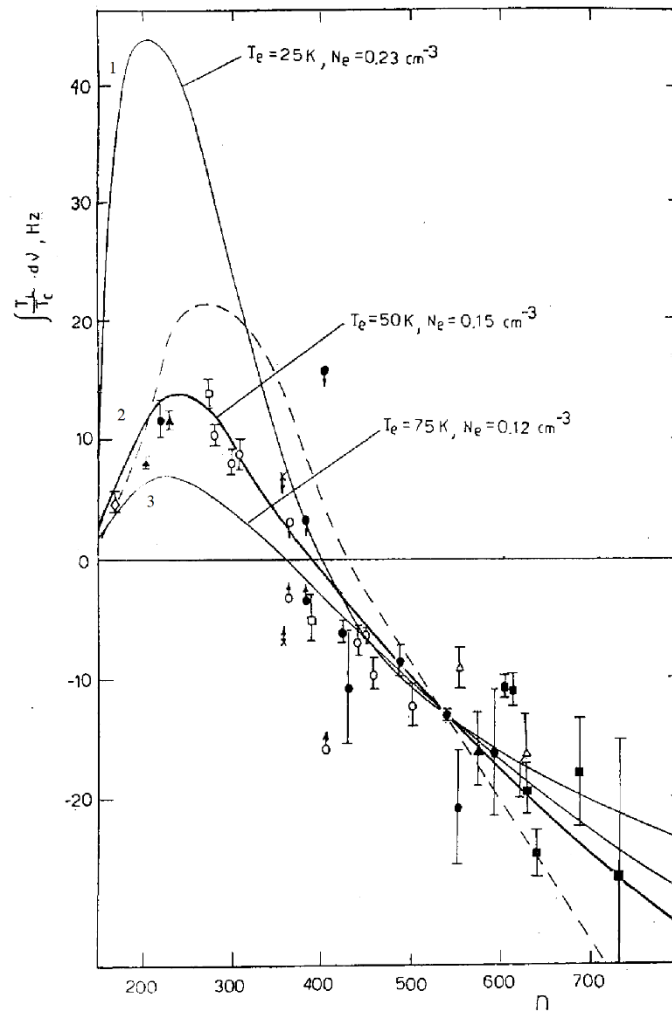


Рис. 3.1. Порівняння спостережуваних відношень інтегральних інтенсивностей РРЛ вуглецю до континуума з розрахунковими значеннями для різних моделей температур та густин для напрямку Cas A. Рисунок взятий з роботи [46].

Використовуючи наведені вище результати спостережень, а також відхиливши «холодну» модель ( $T_e = 20$  К), у роботі [68] було розглянуто «теплу» модель із різним внеском випромінювання від Cas A. При температурі  $T_e = 75$  К було розраховано три комбінації: 1)  $N_e = 0.15$   $\text{cm}^{-3}$ ,  $I_{CasA} = 0$ ; 2)  $N_e = 0.11$   $\text{cm}^{-3}$ ,  $I_{CasA} = I_{BG,R}$ ; 3)  $N_e = 0.02$   $\text{cm}^{-3}$ ,  $I_{CasA} = 3 \cdot I_{BG,R}$ . Незважаючи на краще узгодження з даними спостережень для першої комбінації, перевагу було віддано третій. Основним аргументом на користь такого вибору було те, що тепловий тиск області C II має відповідати тиску МЗС. У першій комбінації, при  $N_e = 0.15$   $\text{cm}^{-3}$  і

$T_e = 75$  К тиск газу (приймалося, як і раніше,  $N_e = N_{C+} = 3 \cdot 10^{-4} N_H \text{ см}^{-3}$  і весь вуглець знаходиться в газовій фазі)  $P/k = N_H T_e = 3.75 \cdot 10^4 \text{ К} \cdot \text{см}^{-3}$ , що майже на порядок перевищує реальний тиск газу в МЗС  $P/k \approx 3700 \text{ К} \cdot \text{см}^{-3}$  [1]. У той самий час для третьої комбінації з  $N_e = 0.02 \text{ см}^{-3}$  тиск області С II  $P/k = 5000 \text{ К} \cdot \text{см}^{-3}$  відповідав тиску газу в МЗС. Передбачалося при цьому, що узгодження з даними спостережень можна поліпшити шляхом ускладнення моделі.

Виявити внесок випромінювання Cas A у розширення ліній вуглецю прямим шляхом, по кривій  $\Delta V_L = f(n)$  і тим самим внести поправку на електронну густину області С II неможливо. Розширення через зіткнення і розширення випромінюванням мають близькі залежності від  $n$  і при помилках вимірювань розділити обидві складові неможливо. Однак інтенсивність РРЛ вуглецю дуже критична до електронної густини. При зменшенні  $N_e$  величина коефіцієнта  $\beta$  та його залежність від  $n$  істотно збільшуються, що, відповідно, змінює залежність інтенсивності ліній вуглецю від  $n$ .

На рис. 3.1 штрихова лінія відповідає розрахунковій кривій відношення інтегральної інтенсивності лінії до континууму при  $T_e = 50$  К та  $N_e = 0.05 \text{ см}^{-3}$ . Така модель узгоджується з вимірними значеннями ширин ліній вуглецю, коли  $I_{CasA} = 0.83 I_{BG,R}$ , що має місце при розташуванні області С II на відстані  $\sim 150$  пк від Cas A. Однак, як видно з рисунку, розбіжності з вимірюваннями інтенсивності дуже суттєві. Принциповим є помітне розходження місця перетину кривої нульового рівня, коли емісійні лінії переходять у лінії поглинання. Розрахункова крива з  $N_e = 0.05 \text{ см}^{-3}$  переходить через нуль при  $n = 438$ , тоді як за даними спостережень це відбувається при  $n = 380 - 400$ . У межах точності вимірювань електронна густина у області С II в напрямку Cas A може бути знижена не більше ніж до  $0.1 \text{ см}^{-3}$ , що визначає мінімальну відстань області С II від Cas A приблизно 250 пк при відстані Cas A від Сонця, що дорівнює 2.8 кпк.

При температурі  $T_e = 50$  К та електронній густині  $N_e = 0.15 \text{ см}^{-3}$  тепловий тиск області С II  $P/k = 2.5 \cdot 10^3 \text{ К} \cdot \text{см}^{-3}$ , що суттєво більше теплового тиску міжшмарного газу в МЗС. Однак при виборі моделі основне значення повинна мата її узгодженість з результатами спостережень. Тому доцільно зупинитися на

моделі з  $T_e = 50$  К та  $N_e = 0.15$  см<sup>-3</sup>, вважаючи, що вона дає значення, найбільш близькі до реальних фізичних умов, і постаратися знайти пояснення можливої причини перевищення тиску газу області С II над тиском МЗС.

Хорошим прикладом частотної залежності формування ліній, особливо на низьких частотах, є багаточастотні спостереження РРЛ вуглецю в напрямку Cas A. У роботі [121] було визначено, що РРЛ проявляють себе у поглинанні нижче 115 МГц ( $n > 384$ ) та в емісії вище 200 МГц ( $n < 320$ ). Феномен переходу від поглинання до емісії зі збільшенням частоти пояснюється відносною важливістю випромінювальних та зіткнувальних процесів, що відбуваються в атомі, які визначають температуру збудження рівня. Іншим ефектом є розширення тиском і випромінюванням, яке розширює лінії зі зменшенням частоти.

У випадку переходів між високими рівнями  $n$ , типовими для ридбергівського атому, заселеності рівнів у більшості регулюються зіткнувальними процесами, спрямованими на те, щоб термалізувати заселеність ( $T_{ex} \sim T_K$ ). Якщо за таких умов є потужне фонове поле випромінювання (наприклад, Cas A,  $T_{R,100} \sim 2.5 \cdot 10^7$  К) або нетепловий галактичний фон, то переходи між високими рівнями  $n$  будуть проявляти себе в поглинанні відносно потужного фону ( $T_{BG} > T_{ex}$ ).

При більш низьких значеннях  $n$  (які також називають «середніми  $n$ »), у відносних заселеностях переважають випромінювальні процеси, що призводить до інвертованих заселеностей та негативних температур збудження. Отже, нерівноважні ефекти дуже важливі. Цей феномен полегшується присутністю зовнішніх індуючих полів випромінювання. Ейнштейнівський коефіцієнт  $A_{mn} \propto \frac{1}{n^5}$ . Таким чином, відносно високі рівні  $n$  через їх нижчу швидкість радіативного згасання стають перенаселеними і в результаті населеності інвертуються. Переходи з «середніми»  $n$ , таким чином, проявляють себе в емісії, оскільки стимульована емісія обумовлена та підтримується потужним фоновим джерелом. Це чітко видно у випадку Cas A. Перехід від поглинання до емісії із збільшенням частоти майже не спостерігається практично у всіх низькощільних хмарах, проте точна частота, на якій відбувається перехід, залежить від фізичних

умов у хмарі. Для газу в рукаві Персея у напрямку Cas A перехід відбувається при  $n = 350 - 360$ . У високощільних хмарах (типових для областей Н II) велика оптична товщина континууму та розширення тиском не дозволяють виявити низькочастотні РРЛ і, таким чином, побачити цей ефект. Лінії, що спостерігаються в напрямку Cas A, ймовірно утворюються в низькощільних ( $N_e \sim 0.1 \text{ см}^{-3}$ ), низькотемпературних хмарах ( $T_e \leq 100 \text{ K}$ ).

### **3.2. Ширококутові високочутливі спостереження низькочастотних РРЛ вуглецю в напрямку Cas A на радіотелескопі УТР-2 за допомогою цифрових спектроаналізаторів DSP-Z**

Як зазначалося раніше (у розділі 2), використання ширококутових цифрових спектроаналізаторів DSP-Z значно підвищує чутливість та ефективність радіоспектроскопічних досліджень на радіотелескопі УТР-2. У рамках виконання даної роботи для відпрацювання методів високочутливих, ширококутових, багатолінійних досліджень РРЛ були проведені спостереження у напрямку середовища, що лежить у напрямку ЗНН Cas A. Вище було сказано, що на промені зору до Cas A містяться холодні міжзор'яні хмари, від яких на фоні вкрай інтенсивного континуального радіовипромінювання від самого ЗНН можуть формуватися РРЛ вуглецю з відносною інтенсивністю на порядок вищою, ніж від інших галактичних напрямків ( $\sim 10^{-3}$ ). Для реєстрації ліній у напрямку Cas A не потрібен великий час накопичення, при спостереженнях у минулі роки за допомогою ЦК РРЛ вистачало часу накопичення в 1 годину. Тому саме цей напрямок було обрано нами для відпрацювання методології та методів високочутливої ширококутової радіоспектроскопії на УТР-2.

Спостереження низькочастотних РРЛ вуглецю в напрямку Cas A на УТР-2 за допомогою DSP-Z були проведені у 2017 – 2021 роках. Для DSP-Z було обрано кореляційний режим роботи, при цьому для аналізу в рамках відпрацювання методології спостережень використовувалися лише перші два масиви даних – спектри, отримані для кожної з антен радіотелескопа («Північ – Південь» та

«Захід – Схід»). Інші два масиви – амплітудний та фазовий крос-спектри, за допомогою яких, як було зазначено у підрозділі 2.3, можна реалізувати синтезування «олівцевої» ДН шириною 25' (на 25 МГц) шляхом перемноження п'ятипроменевої «ножової» ДН антени «Північ – Південь» з «ножовою» ДН антени «Захід – Схід». Спостереження з такою високою кутовою роздільною здатністю допоможуть знайти тонкоструктурні особливості областей С II, уточнити структуру цих областей аж до клампів, але дана робота присвячена великомасштабному вивченню іонізованого газу в Галактиці, і далі, базуючись на отриманих результатах, є сенс більш ретельно вивчати окремі ділянки МЗС з метою визначення їх просторового розподілу, кутового розміру, динамічних та інших характеристик.

Часова роздільна здатність у всіх отриманих наборах даних дорівнювала 100 мс, частотна роздільна здатність у більшості наборів складала 4 кГц. При сприятливих умовах спостережень (з-за відсутності великої кількості завад) отримані дані було стиснуто у 50 разів перед етапом видалення завад, що суттєво скоротило час на обробку, усунуло досить низькоінтенсивні незкорельовані завади та підвищило відношення сигнал/шум. Також на результати спостережень позитивним чином впливала відсутність похибок у системі фазування з-за збоїв у перемиканнях реле у фазообертачах під час вимірювань.

На рис. 3.2 наведено спектр серії 88  $\alpha$ -РРЛ вуглецю, отриманий 18 жовтня 2017 року на антені «Північ – Південь» у напрямку Cas A. Реальний час накопичення складав 31 хвилину (після видалення з усереднення блоків, пошкоджених завадами та викривленнями смуги аналізу; пошкоджені завадами блоки складають менше 15% від усього об'єму даних). Видно, що навіть такого часу цілком достатньо для впевненої реєстрації РРЛ при застосуванні в якості реєстратора спектроаналізатора DSP-Z.

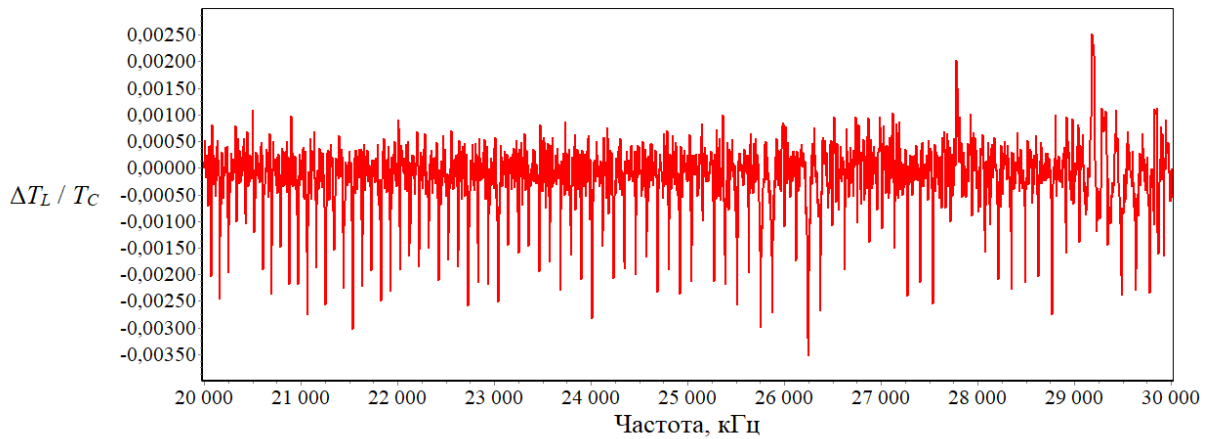


Рис. 3.2. Спектр серії РРЛ вуглецю С602 $\alpha$  – С689 $\alpha$ , отриманий у напрямку Cas A в смузі 20 – 30 МГц на антені «Північ – Південь» радіотелескопа УТР-2 за допомогою DSP-Z 18 жовтня 2017 року о 01:10 – 01:47 місцевого часу. Реальний час накопичення складає 31 хвилину.

На рис. 3.3. наведено спектр, отриманий у напрямку Cas A за весь нічний сеанс спостережень 17 – 18 жовтня 2017 року із реальним часом накопичення більше 4 годин. На рис. 3.4 наведено усереднені серії РРЛ вуглецю із цього спектру в смугах 20 – 22 МГц і 26 – 28 МГц. Інтенсивності РРЛ близько частоти 21 МГц трохи нижчі, ніж інтенсивності ліній на частоті близько 27 МГц, що узгоджується із нещодавно уточненою теорією впливу коефіцієнтів нерівноважності на спостережувані інтенсивності низькочастотних РРЛ [48, 70, 71] та в цілому узгоджується з результатами роботи [120]. Слід відзначити, що частотна роздільна здатність при даних спостереженнях складала 4 кГц, що може завищувати ширини ліній та недооцінювати інтенсивності. Ширина усереднених ліній на частотах 21 і 27 МГц практично однакова і складає приблизно 8 кГц, хоча згідно з розрахунками на більш високій частоті ширина повинна бути дещо менша. Збільшення ширин ліній на більш низьких частотах є результатом домінуючого впливу механізмів розширення тиском та радіативного розширення, однак при значенні частотної роздільної здатності в 4 кГц цей ефект, нажаль, неможливо побачити.

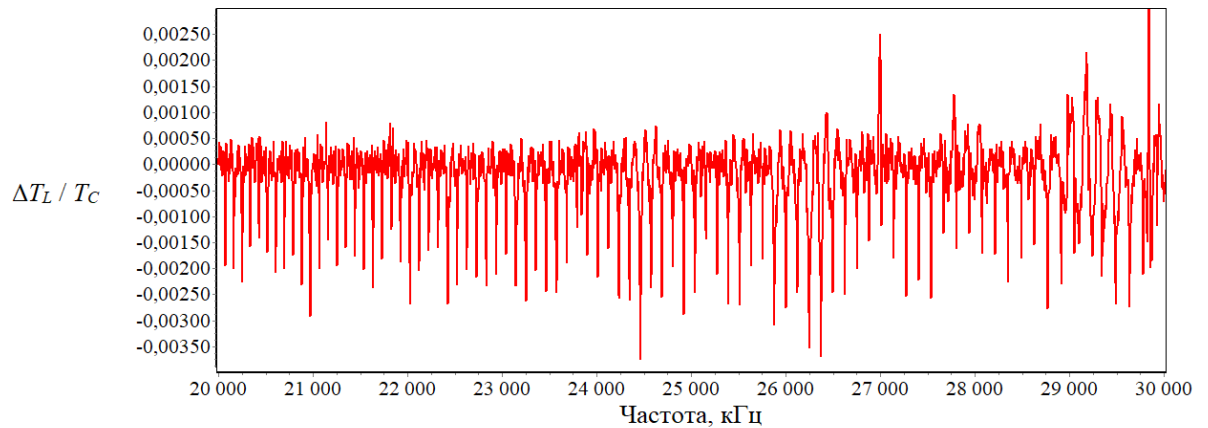


Рис. 3.3. Спектр серії РРЛ вуглецю C602 $\alpha$  – C689 $\alpha$ , отриманий у напрямку Cas A в смузі 20 – 30 МГц на антені «Північ – Південь» радіотелескопа УТР-2 за допомогою DSP-Z 17 – 18 жовтня 2019 року з 23:57 до 04:49 місцевого часу. Реальний час накопичення складає 4 години 13 хвилин.

На рис. 3.5 наведено спектр, отриманий у смузі 20 – 30 МГц у напрямку Cas A 22 квітня 2020 року з реальним часом накопичення 68 хвилин. Даний спектр має гірше співвідношення сигнал/шум з-за суттєвого спотворення спектрів іоносферними мерехтіннями внаслідок збільшення сонячної активності. Для даного набору даних було реалізовано більш ретельну процедуру видалення завад, дані не були стиснуті, а проаналізовано було кожний блок у наявних файлах. Велика кількість блоків з пошкодженими даними та викаженнями смуги аналізу була відфільтрована. Незважаючи на вплив іоносферних мерехтінь, все ж таки можливо отримати високу чутливість вимірювань для подальших операцій із спектрами.



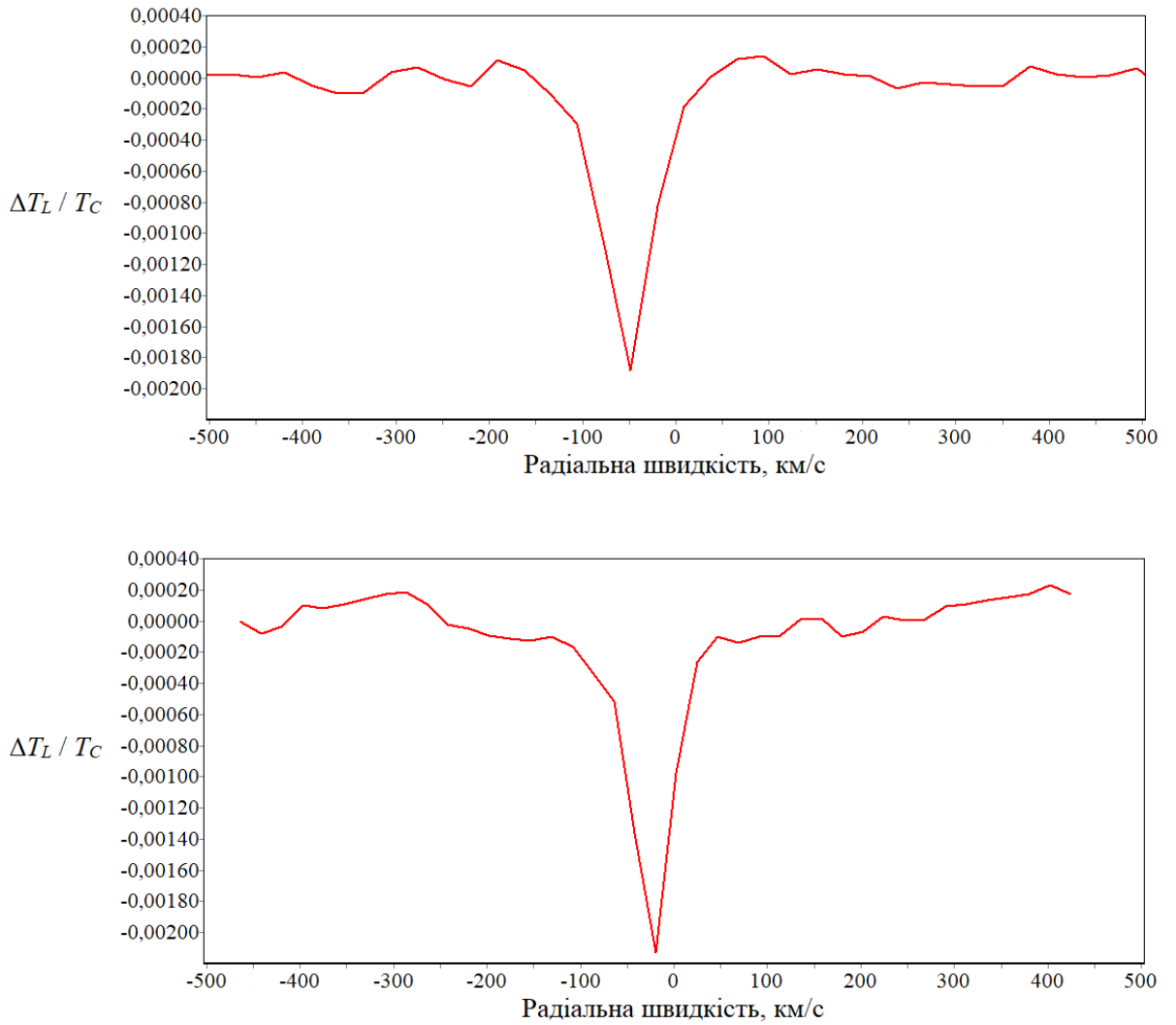


Рис. 3.4. *Зверху* – усереднений спектр серії РРЛ вуглецю С669а – С689а, отриманий у смузі 20 – 22 МГц, ефективний час накопичення складає (21 лінія × 4 години) 84 години. *Знизу* – усереднений спектр серії РРЛ вуглецю С617а – С632а, отриманий у смузі 26 – 28 МГц, ефективний час накопичення складає (16 ліній × 4 години) 64 години. Враховано доплерівський зсув частот ліній: на 21 МГц  $D_{shift} = 0.6968$  кГц, на 27 МГц  $D_{shift} = 0.8959$  кГц.

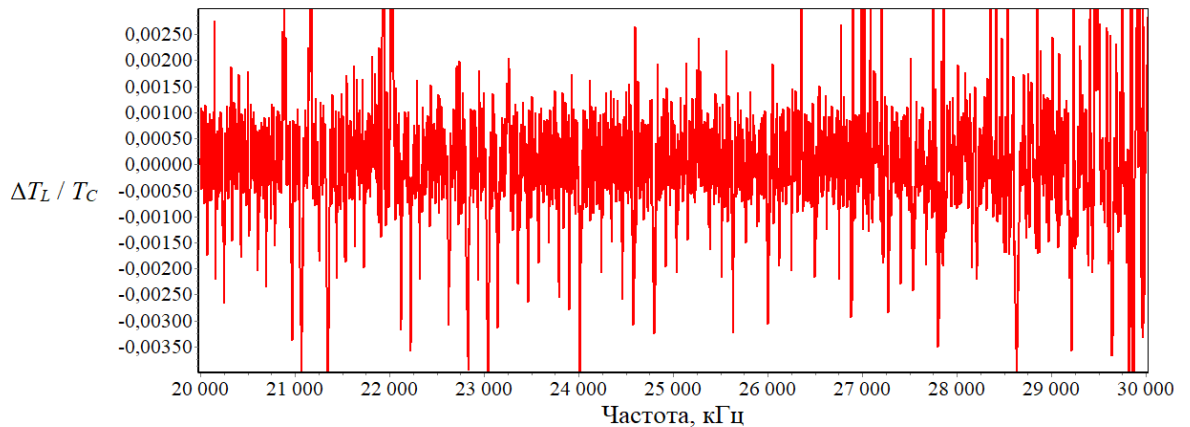


Рис. 3.5. Спектр серії РРЛ вуглецю C602 $\alpha$  – C689 $\alpha$ , отриманий у напрямку Cas A в смузі 20 – 30 МГц на антені «Північ – Південь» радіотелескопа УТР-2 за допомогою DSP-Z 22 квітня 2020 року о 02:39 – 03:52 місцевого часу. Реальний час накопичення складає 68 хвилин. Відношення сигнал/шум погіршене впливом іоносферних мерехтінь.

Усі вищенаведені результати підтверджують ефективність методології високочутливої, широкопasmової радіоспектроскопії на радіотелескопі УТР-2. Розширення смуги аналізу і використання у якості реєстраторів із великим динамічним діапазоном дозволяє значно скорочувати необхідний час роботи радіотелескопа і здійснювати реєстрацію ліній навіть у несприятливих умовах спостережень.

### **3.3. Спостереження низькочастотних РРЛ вуглецю в напрямку емісійної туманності S140 та гігантської оболонки нейтрального гідрогену GSH 139-03-69 на радіотелескопі УТР-2 за допомогою ЦК**

Окрім спостережень за допомогою цифрових спектроаналізаторів DSP-Z, у рамках даної роботи був проведений астрофізичний аналіз радіоспектроскопічних даних, отриманих на УТР-2 за допомогою 4096-канального ЦК у 2002 – 2003 роках у напрямку емісійної туманності S140, а також виконано попередній аналіз даних, отриманих для напрямку поблизу галактичної площини, що

співпадає з місцерозташуванням гігантської оболонки холодного нейтрального водню GSH 139-03-69 [125].

Емісійна туманність S140 знаходиться на межі молекулярної хмари L1204, що лежить у галактичній площині. Цей напрямок являє собою особливий інтерес, оскільки й туманність S140, й сусідня молекулярна хмара L1204 є двома прикладами близько розташованих об'єктів, що знаходяться на різних стадіях процесу зореутворення. Напрямок S140/L1204 було добре вивчено у різних типах спектральних ліній, у тому числі й в РРЛ. У роботі [126] на основі спостережень високочастотних РРЛ вуглецю C142 $\alpha$  і C166 $\alpha$  опосередковано було припущено існування області С II у напрямку комплексу S140/L1204. У роботі [127] повідомлялося про дослідження РРЛ N165 $\alpha$ , N166 $\alpha$ , C165 $\alpha$  та C166 $\alpha$  у напрямку S140/L1204 поблизу частоти 1420 МГц на 100-метровому Еффельсберзькому радіотелескопі. Для області С II були визначені фізичні умови:  $T_e \sim 75$  К і  $N_e \sim 0.5$  см<sup>-3</sup>. Напрямок S140 також вивчався за допомогою декаметрових РРЛ вуглецю. В роботі [56] було описане перше виявлення низькочастотної вуглецевої лінії C640 $\alpha$  в напрямку S140 поблизу частоти 25 МГц на радіотелескопі УТР-2. Спостережувані відносні інтенсивності ліній були оцінені як  $10 \pm 3 \cdot 10^{-4}$  для антени «Північ – Південь» та  $5 \pm 2 \cdot 10^{-4}$  для антени «Захід – Схід» УТР-2. Визначені радіальні швидкості РРЛ для антен «Північ – Південь» і «Захід – Схід» становлять  $-6 \pm 17$  км/с і  $-36 \pm 17$  км/с відповідно. На основі отриманої ширини лінії в  $96 \pm 24$  км/с автори змогли отримати верхню межу  $N_e \leq 1$  см<sup>-3</sup>. Також було припущено, що  $T_e \geq 20$  К. Лінійні та кутові розміри області С II, відповідальної за формування низькочастотних ліній у напрямку S140, було оцінено як  $2 \div 6$  пк та  $7' \div 20'$  відповідно при відстані до S140 приблизно в 1 кпк. Аналіз в роботі [56] не включав механізм заселення високозбуджених рівнів через низькотемпературну диелектронну рекомбінацію. У роботі [128] було зроблено спробу виявити лінію C540 $\alpha$  в напрямку S140 поблизу 42 МГц на радіотелескопі ДКР-1000. В отриманих спектрах її не було виявлено, хоча й очікувалося, що вона буде мати більшу інтенсивність, ніж декаметрова лінія C640 $\alpha$ . Проте автори отримали верхню межу інтенсивності для виявлення РРЛ на метрових довжинах хвиль

( $\leq 3,6 \cdot 10^{-4}$ ). Вони також пояснили досить велику ширину лінії C640 $\alpha$ , що була отримана в [56]. Було висловлено припущення, що основний внесок у розширення лінії скоріш роблять високошвидкісні турбулентні рухи в МЗС, а не зіткнення між рідберговськими атомами й електронами. Така велика ширина лінії не узгоджується з ширинами високочастотних РРЛ вуглецю (приблизно  $2 \div 5$  км/с). В роботі [128] автори припустили, що область С II, де утворилися спостережувані декаметрові РРЛ вуглецю в напрямку S140, не пов'язана із самою туманністю S140. Дані спостережень C640 $\alpha$  та лінії нейтрального гідрогену H I також були порівняні в [128]. Між ними було виявлено гарне узгодження. Максимуми обох ліній відповідають радіальним швидкостям близько 0 км/с. Також було припущено, що декаметрові РРЛ у напрямку S140 утворюються в множинних дифузних хмарах H I, що розташовані на промені зору. Такі хмари мають типові значення  $N_H = 6 \div 20$  см $^{-3}$ ,  $N_e \sim 0,02$  см $^{-3}$  і  $T_e = 60 \div 80$  К. Вуглець у цих хмарах повністю іонізований УФ-випромінюванням з  $91.2$  нм  $< \lambda < 110$  нм.

Ще одним об'єктом дослідження було обрано середовище у напрямку на гігантську оболонку нейтрального гідрогену GSH 139-03-69. «Класичні» хмари H I, як було зазначено вище, мають  $T_e = 60 \div 80$  К,  $N_e \sim 0,02$  см $^{-3}$ ,  $N_H = 6 \div 20$  см $^{-3}$  і протягом багатьох років інтенсивно вивчаються за допомогою лінії H I. Було зроблено багато оглядів галактичної площини в лінії H I, одним із яких є огляд LAB («Лейден/Аргентина/Бонн») [96]. Однак, крім «класичних» хмар H I, існують також і хмари H I, які містять ще більш холодний газ. Зазвичай вони менше «класичних» та їх легко спостерігати на тлі яскравих дискретних джерел. Досліджувати їх у лінії H I на тлі фону Галактики досить проблематично [129]. Але також можуть існувати об'єми холодного газу H I в Галактиці із розмірами, що перевищують не тільки розміри «класичних» хмар H I, але й розміри молекулярних хмар і навіть цілих комплексів молекулярних хмар. Прикладом такого об'єкта є гігантська оболонка нейтрального гідрогену GSH 139-03-69, що розташована в галактичній площині на відстані 9 кпк від Сонця і 16 кпк від галактичного центра. Оболонка має розмір  $2.8$  кпк  $\times$   $1.6$  кпк, що можна порівняти з розмірами комплексів гігантських молекулярних хмар [129]. В роботі [130] було

описано дослідження GSH 139-03-69 в лінії HISA на синтезному телескопі Dominion Radio Astrophysical Observatory (DRAO) в Канаді. Були проведені спостереження ділянки північної межі (дуги) цієї оболонки розміром більше  $15^\circ$  відносно галактичної довготи і приблизно  $1^\circ$  відносно галактичної широти (рис. 1 в [130]). Результати показали присутність великого об'єму холодного HI з великою оптичною товщею ( $\tau \approx 1$ ) і низькою яскравісною температурою оболонки ( $\sim 10 \div 20$  K) і фонового газу HI ( $\sim 15 \div 40$  K). Ці оцінки є верхньою межею значень температур у напрямку GSH 139-03-69, які насправді можуть бути ще нижчими (але не нижче 2.7 K, температури «реліктового» мікрохвильового фону). Діапазон радіальних швидкостей за спостереженнями лінії HISA становив  $-87 \div -59$  км/с. Маса цієї оболонки становить  $(1,9 \cdot 10^7) \times M_\odot$  (що дорівнює 48 масам «класичних» дифузних хмар HI). Верхня межа стовпцевої густини становила  $5 \cdot 10^{19}$  см<sup>-2</sup>. Атомарний гідроген з такими низькими температурами дуже рідко спостерігався в Галактиці. На підставі виконаного в роботі [130] аналізу було зазначено, що наявність такого великого об'єму холодного HI в МЗС суперечить загальноприйнятій гіпотезі про те, що холодний газ здебільшого міститься лише в молекулярних хмарах. Проте отримані в роботі [130] результати показують важливість дослідження таких об'ємів досить холодного атомарного газу на тлі власного галактичного радіовипромінювання. Точний механізм утворення цієї гігантської оболонки наразі невідомий, але такі об'єкти, безсумнівно, відіграють важливу роль у багатофазній структурі МЗС.

Протягом багатьох років були запропоновані різні моделі областей С II. Найкращу відповідність між теоретичними оцінками та експериментальними даними у широкому діапазоні частот мають моделі для напрямку Cas A [68 і посилання в ній]. У цих роботах було отримане хороше узгодження для «теплої» моделі, яка передбачає формування спостережуваних ліній у дифузних нейтральних хмарах HI, де під впливом УФ-фотонів з  $91.2 \text{ нм} < \lambda < 110 \text{ нм}$  вуглець майже повністю іонізований. Фізичним умовам середовища в цій моделі відповідають  $T_e \sim 75$  K,  $N_e \sim 0,02$  см<sup>-3</sup>. Високозбуджені рівні заселяються за

допомогою механізму низькотемпературної діелектронної рекомбінації. У роботі [58] також було висловлено припущення, що низькочастотні вуглецеві РРЛ в різних напрямках галактичної площини утворюються в дифузних хмарах Н І на промені зору. У світлі цього є сенс проведення спостережень декаметрових РРЛ вуглецю у різних напрямках Галактики для уточнення моделі середовища та його фізичних параметрів, а також для оцінки розміру областей С ІІ. Вищенаведені факти підвищують інтерес до цих досліджень, оскільки декаметрові РРЛ можуть бути використані не тільки для визначення фізичних умов в областях С ІІ, але й для підтвердження існування холодних газових комплексів Н І та незалежної оцінки їхніх розмірів, іонізаційних станів та інших параметрів. Виявлення компонента профілю, відповідального за поглинання газу від GSH 139-03-69, стане важливим кроком у продовженні вивчення таких гігантських об'ємів нейтрального газу поблизу галактичної площини, їх еволюції, а також визначення їх фізичних і кінематичних параметрів.

Крім того, за час, що пройшов від першого виявлення декаметрових РРЛ вуглецю в напрямку S140 [56] було модернізовано ЦК на радіотелескопі УТР-2. Було розширено смугу аналізу і кількість спектральних каналів, що дає значно вищу чутливість для радіоспектроскопічних досліджень.

У спостереженнях була використана антена «Північ – Південь» радіотелескопа УТР-2 (1440 диполів, ефективна площа 100000 м<sup>2</sup>, кутова роздільна здатність  $\alpha \times \delta = 12^\circ \times 20'$ ). Центральною частотою спостережень було обрано 26 МГц, що зумовлювалось заводовою ситуацією на період спостережень. Було обрано смугу аналізу ЦК шириною 1.2 МГц. Це дозволило одночасно спостерігати одинадцять  $\alpha$ -РРЛ, що відповідають переходам з квантовими числами від 627 до 637. Було обрано частоту дискретизації для ЦК 3.7 МГц. Разом із великою кількістю каналів ЦК (4096) це дозволило реалізувати частотну роздільну здатність близько 1 кГц. Спостереження проводились у нічний час сесіями по 6-8 годин. У таблиці 3.1 наведена інформація стосовно спостережень, час накопичення та відповідні координати спостережуваних напрямків. Дані ЦК записувалися на ПК чотирьохвилинними вибірками. Цей період накопичення було

обрано як оптимальний на основі завадової ситуації та який забезпечує мінімальні втрати даних через вплив ширококутових завад.

Таблиця 3.1

Інформація про спостереження РРЛ, виконані на радіотелескопі  
УТР-2 за допомогою ЦК

Напрямок	Галактичні координати	Частота, МГц	Ефективний час накопичення	Рік спостережень
S140	$l = 106.8^\circ, b = +5.32^\circ$	26	108 годин	2003
G105.15+2.8	$l = 105.15^\circ, b = +2.8^\circ$	26	46 годин	2003
G108.48+7.83	$l = 108.48^\circ, b = +7.83^\circ$	26	72 години	2003
G140.00+0.00	$l = 140.0^\circ, b = 0.0^\circ$	25	155 годин	2005
GSH 139-03-69	$l = 137.0^\circ, b = +2.1^\circ$	26	340 годин	2002
GSH 139-03-69	$l = 137.0^\circ, b = +2.1^\circ$	26	167 годин	2003
G145.00+0.00	$l = 145.0^\circ, b = 0.0^\circ$	26	227 годин	2002
G137.00-6.00	$l = 137.0^\circ, b = -6.0^\circ$	26	47 годин	2002

Донедавна не було виконано жодних спостережень, які б чітко підтверджували або спростовували зв'язок області С II, що відповідальна за формування низькочастотних РРЛ, із самою туманністю S140. Таким чином, завдяки підвищеній чутливості ЦК є можливість провести спостереження в цьому напрямку для оцінки меж області С II та визначення зв'язку цієї області з комплексом S140/L1204.

На рис. 3.6 наведено спектр із серією усереднених декаметрових РРЛ вуглецю С627 $\alpha$  – С637 $\alpha$ , зареєстрованих у напрямку туманності S140. Окрім цього, наведено спектр дециметрової РРЛ вуглецю С166 $\alpha$ , взятий з роботи [126]. Також на цьому та всіх наступних рисунках для кожного напрямку разом із спектрами РРЛ наведені спектри лінії Н I з огляду LAB [96], синтезовані для ширини променя  $12^\circ \times 12^\circ$  (відносно більшого розміру ДН антени «Північ – Південь» УТР-2). Ширину зареєстрованих декаметрових ліній було отримано вписуванням профілю Гаусса в профілі ліній. Значення отриманих характеристик ліній РРЛ наведено в таблиці 3.2.

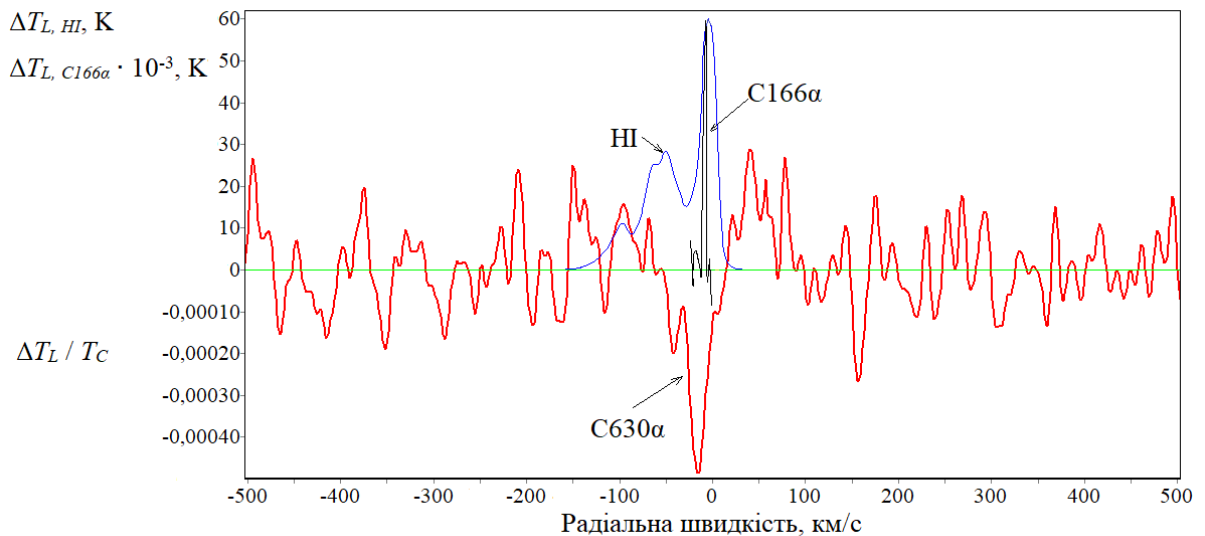


Рис. 3.6. Червона лінія – Усереднений спектр серії РРЛ вуглецю C627 $\alpha$  – C637 $\alpha$ , виміряний у напрямку S140, ефективний час накопичення складає 108 годин. Синя лінія – Спектр лінії H I, виміряний у напрямку S140 (дані взято з огляду LAB [96] та синтезовано до кутової роздільної здатності 12° × 12°). Чорна лінія – Спектр РРЛ вуглецю C166 $\alpha$ , виміряний у напрямку S140, час накопичення 15 годин [126].

Оскільки в попередніх роботах було зроблено припущення про зв'язок областей C II, що відповідають за формування низькочастотних РРЛ вуглецю, із хмарами H I, цікаво одночасно дослідити разом з РРЛ і лінію H I у напрямку S140 та за його межами. Із спектрів лінії H I видно, що в напрямку S140 лінія утворюється у місцевій МЗС в просторово протяжній області (розміром до 10°). Дотримуючись наведеної вище гіпотези про зв'язок областей формування ліній двох типів, очікується, що декаметрові РРЛ, виявлені в цьому напрямку, також були сформовані у просторово протяжних структурах місцевої МЗС, які не пов'язані із самою туманністю S140. Для оцінки меж області C II, відповідальної за формування декаметрових РРЛ у напрямку S140, на УТР-2 були проведені спостереження у двох напрямках, зміщених від напрямку до S140 на 3° відносно схилення. Напрямок G105.15+2.8 відповідає відхиленню від S140 у бік негативних схилень, а напрямок G108.48+7.83 відповідає відхиленню від S140 у



бік позитивних схилень. На рис. 3.7 і 3.8 наведено спектри усереднених серій РРЛ вуглецю C627 $\alpha$  – C637 $\alpha$ , виявлених у цих двох напрямках відповідно. Порівняно із рис. 3.6 видно, що інтенсивність ліній істотно не змінюється при відхиленні променя радіотелескопа від напрямку на S140. Порівняння спектрів РРЛ і Н I чітко показує збіг радіальних швидкостей областей С II і хмар Н I, а також однаковий характер зміни інтенсивностей РРЛ і яскравісної температури в лінії Н I у трьох спостережних точках. Це говорить на користь гіпотези про утворення РРЛ вуглецю у протяжній групі хмар Н I, де гідроген є нейтральним, а вуглець іонізується фоновим УФ-випромінюванням, що виходить із областей Н II в Галактичній площині. Також це не підтверджує припущення про те, що розмір області С II менше 20'. Компоненти РРЛ вуглецю з радіальними швидкостями від  $\sim -50$  км/с до  $\sim 0$  км/с згідно із стандартною моделлю обертання речовини в нашій Галактиці відповідають газу, що знаходиться у спіральних рукавах Персея та Оріона.

Шляхом порівняння радіальних швидкостей декаметрових і дециметрових РРЛ вуглецю (лінія C166 $\alpha$ , [126]) вдалося зробити висновок про те, що області С II у напрямку S140, що відповідають за декаметрові і дециметрові лінії, просторово не корелюють між собою. Дециметрові вуглецеві лінії формуються у високощільній області С II навколо самої туманності, іонізованої потужним УФ-випромінюванням від найближчих потужних зір. Декаметрові лінії формуються в областях С II, просторово асоційованих із хмарним нейтральним гідрогеном Н I та іонізованих стороннім УФ-випромінюванням із довжиною хвилі  $91.2 \text{ нм} < \lambda < 110 \text{ нм}$  та під дією механізму діелектронно-подібної рекомбінації (рис. 3.9). Інтенсивності декаметрових і дециметрових РРЛ вуглецю мають різну залежність від частоти, що обумовлено різницею параметрів фізичних умов, відстежуваних двома типами ліній (рис. 3.10).

## Отримані характеристики низькочастотних РРЛ вуглецю

Напрямок	$\Delta T_L / T_C$ $\times 10^{-4}$	$V_{LSR}$ , км/с	$\Delta v$ , кГц	$\Delta V$ , км/с	$I_L$ , с <sup>-1</sup>
S140	6.2	-16	2	23.06	-1.54
G105.15+2.8	8.1	-29	4.5	51.88	-2.92
G108.48+7.83	6.8	-16	1.75	20.17	-1.04
G140.00+0.00	4.3	-16	3.6	43.4	-1.07
GSH 139-03-69 (2002)	2.7	-32 (-7)	3.8	44.6	-0.78
GSH 139-03-69 (2003)	3	-19	3.12	36.03	-0.86
G145.00+0.00	3.4	0	4.5	51.88	-0.95
G137.00-6.00	-	-	-	-	-

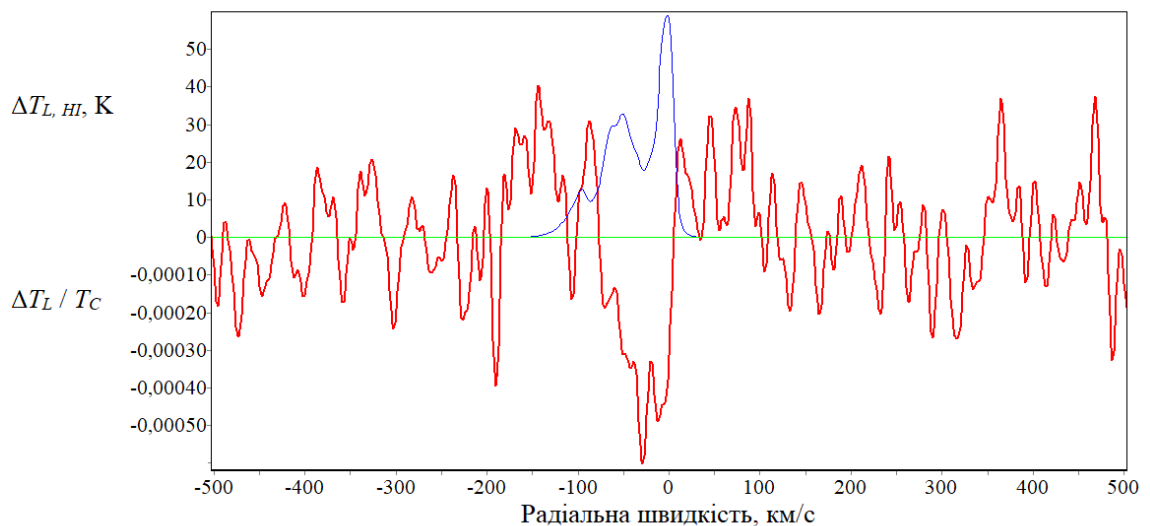


Рис. 3.7. Червона лінія – Усереднений спектр серії РРЛ вуглецю С627а – С637а, виміряний у напрямку G105.15+2.8 (відхилення на 3° від S140 у бік негативних схилень). Синя лінія – Синтезований спектр лінії Н I, виміряний у напрямку G105.15+2.8.

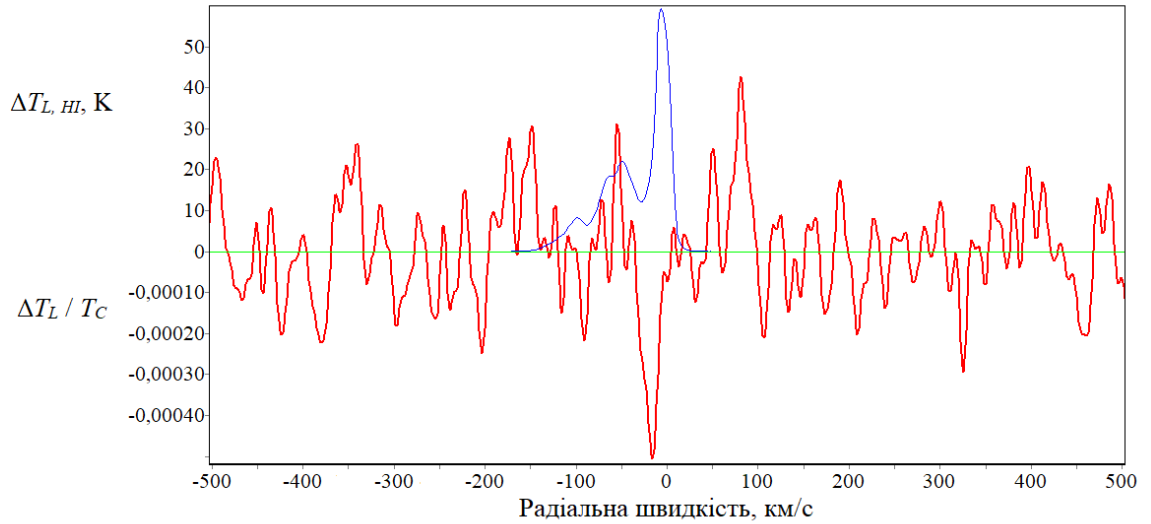


Рис. 3.8. Червона лінія – Усереднений спектр серії РРЛ вуглецю C627α – C637α, вимірний у напрямку G108.48+7.83 (відхилення на 3° від S140 у бік позитивних схилень). Синя лінія – Синтезований спектр лінії H I, вимірний у напрямку G108.48+7.83.

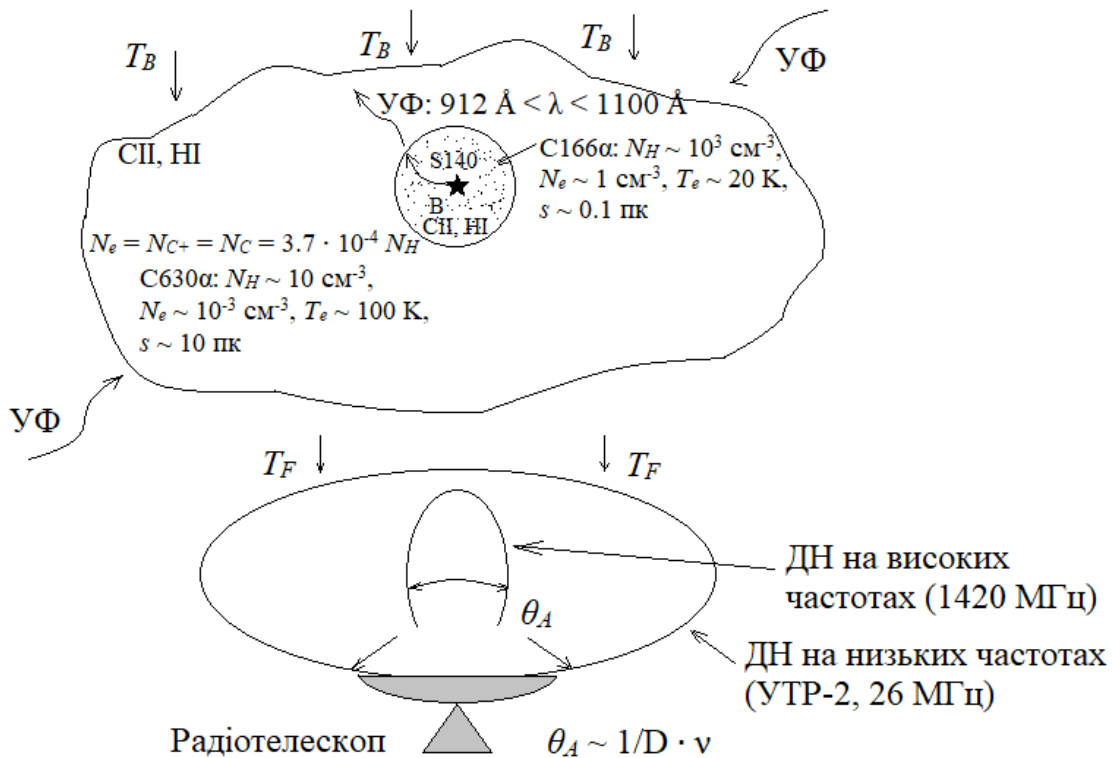


Рис. 3.9. Багаточастотна модель міжзоряного комплексу: туманність S140 – дифузна хмара H I із іонізованим вуглецем.

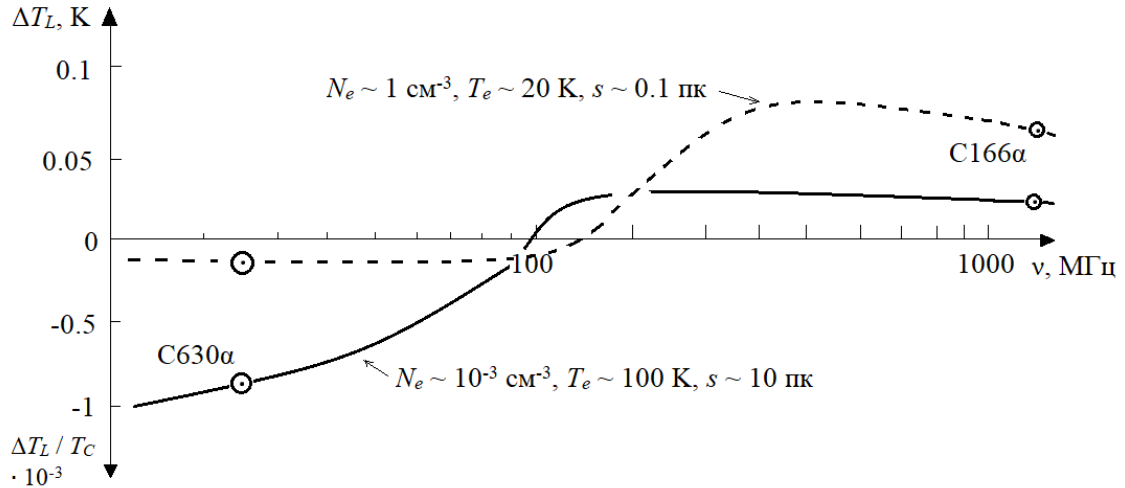


Рис. 3.10. Частотна залежність інтенсивностей РРЛ, що були сформовані у холодних, високощільних областях С II та в дифузних областях С II, асоційованих із нейтральним гідрогеном Н I.

На підставі результатів досліджень лінії HISA у напрямку GSH 139-03-69 було зроблено висновок, що ця лінія виникає в середовищі з дуже низькою температурою ( $\sim 10$  K). Оскільки припускається асоціація області С II, відповідальної за формування декаметрових РРЛ, і хмар Н I, спостереження декаметрових ліній у напрямку GSH 139-03-69 є іншим способом підтвердження існування такого об'єму холодного нейтрального атомарного гідрогену в галактичній площині. Для підтвердження гіпотези про асоціацію областей С II і хмар Н I спектри РРЛ, отримані на УТР-2, були порівняні зі спектрами лінії Н I, отриманими при виконанні огляду LAB для кількох напрямків площини Галактики ( $l = 70^\circ \div 150^\circ$ ,  $b = 0^\circ$ ). На рис. 3.11 для прикладу наведено результати порівняння спектрів декаметрових РРЛ і лінії Н I в позиції  $l = 140^\circ$ ,  $b = 0^\circ$ . Було отримано добре узгодження радіальних швидкостей для обох типів спектральних ліній і, відповідно, можна сказати, що два типи ліній можуть утворюватися у тому ж самому газі.

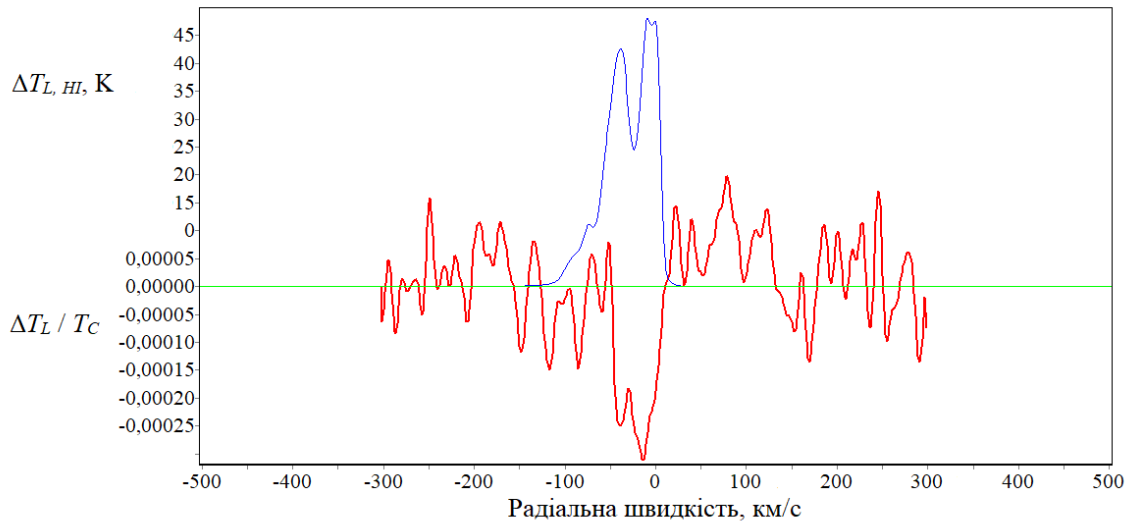


Рис. 3.11. Червона лінія – Усереднений спектр серії РРЛ вуглецю С635 $\alpha$  – С645 $\alpha$  (частота 25 МГц), виміряний у напрямку G140+00. Синя лінія – Синтезований спектр лінії Н I, виміряний у напрямку G140+00.

У 2002-2003 рр. на УТР-2 були проведені пошукові дослідження декаметрових РРЛ вуглецю в напрямку GSH 139-03-69. Спектр усередненої серії РРЛ вуглецю в цьому напрямку, отриманий у 2002 році, показаний на рис. 3.12. Спектр, виміряний у тому ж напрямку в 2003 році, показаний на рис. 3.13. В обох спектрах, окрім компонентів із радіальними швидкостями  $-50$  км/с і  $0$  км/с, що відповідають рукавам Персея та Оріона, є також слабкий компонент лінії з радіальною швидкістю близько  $-80$  км/с, що відповідає зовнішньому галактичному рукаву. При цій радіальній швидкості в напрямку GSH 139-03-69 було зареєстровано лінію HISA.

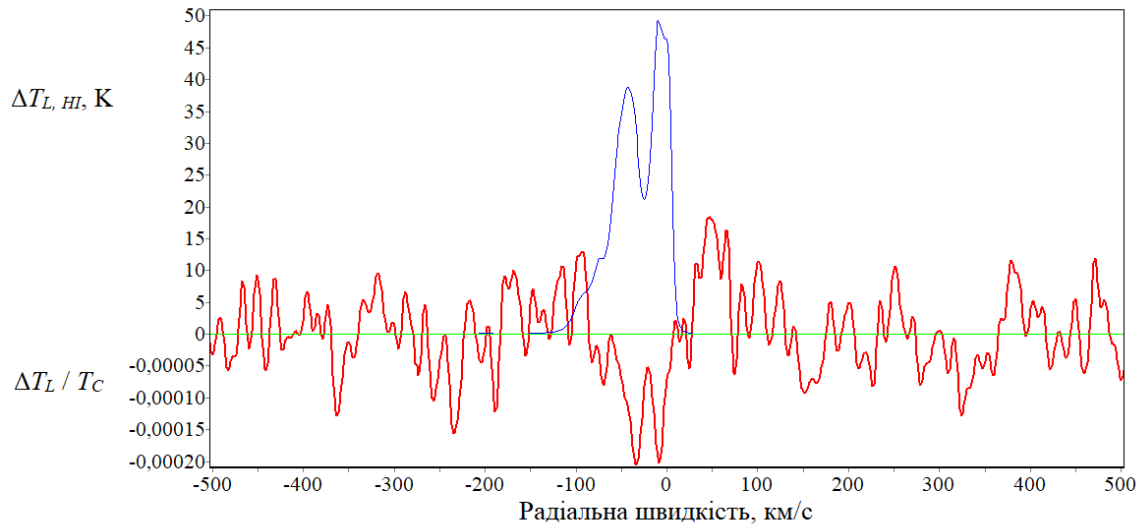


Рис. 3.12. Червона лінія – Усереднений спектр серії РРЛ вуглецю С627 $\alpha$  – С637 $\alpha$ , виміряний у напрямку GSH 139-03-69 у 2002 році, ефективний час накопичення складає 340 годин. Синя лінія – Спектр лінії Н I, виміряний у напрямку GSH 139-03-69 та синтезований до кутової роздільної здатності 12°  $\times$  12°.

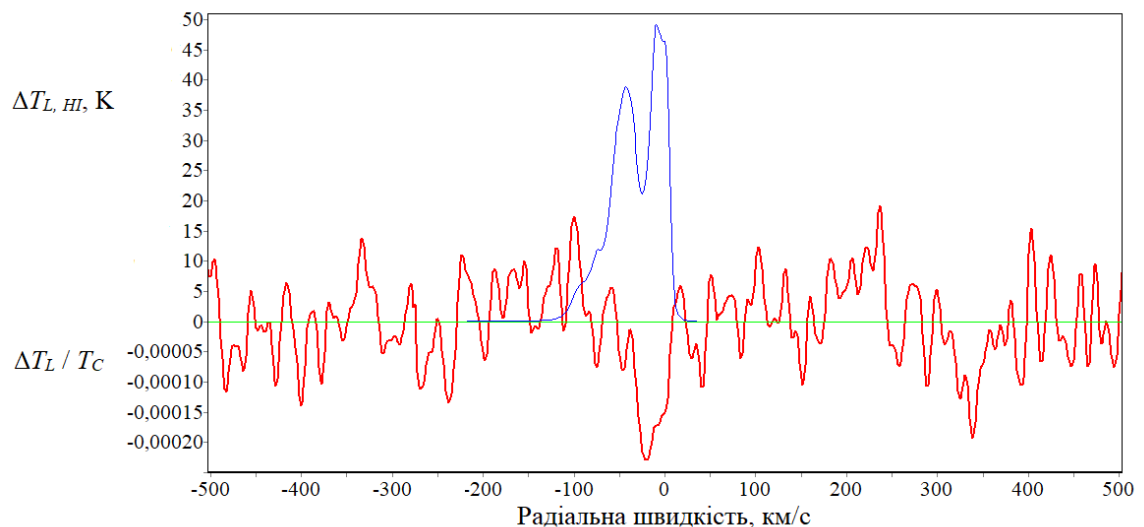


Рис. 3.13. Червона лінія – Усереднений спектр серії РРЛ вуглецю С627 $\alpha$  – С637 $\alpha$ , виміряний у напрямку GSH 139-03-69 у 2003 році. Синя лінія – Синтезований спектр лінії Н I, виміряний у напрямку GSH 139-03-69.

Для оцінки розміру області С II, відповідальної за формування декаметрових РРЛ вуглецю в напрямку GSH 139-03-69, також були проведені спостереження в напрямку  $l = 145^\circ$ ,  $b = 0^\circ$  (з відхиленням променя УТР-2 на  $8^\circ$  по

галактичній довготі). Відповідний спектр із серією усереднених декаметрових РРЛ вуглецю наведено на рис. 3.14. У цьому напрямку не було зареєстровано компонента РРЛ із радіальною швидкістю  $-80$  км/с, як не було зареєстровано і лінії HISA.

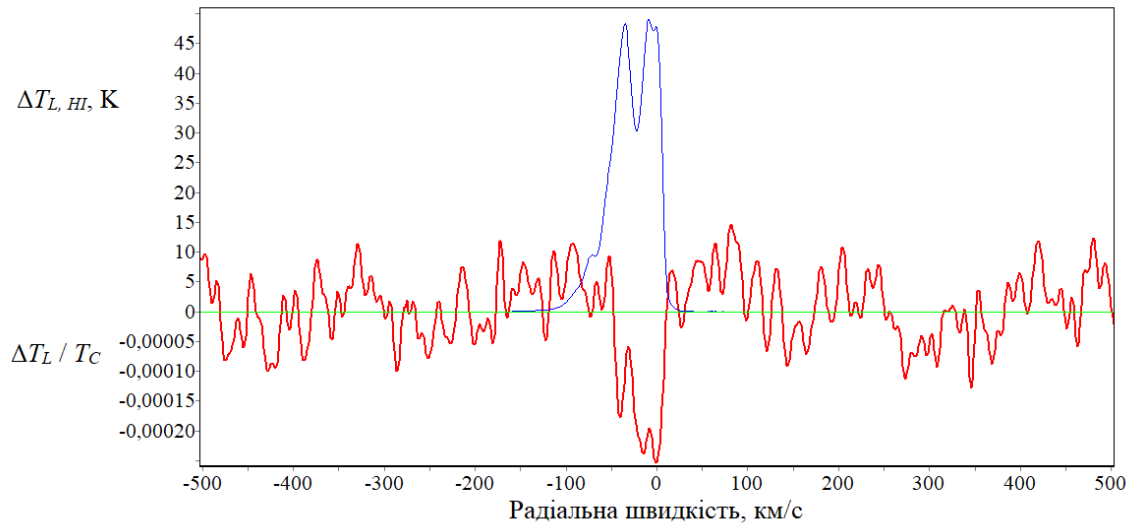


Рис. 3.14. Червона лінія – Усереднений спектр серії РРЛ вуглецю  $S_{627\alpha} - S_{637\alpha}$ , виміряний у напрямку G145+00. Синя лінія – Синтезований спектр лінії HI, виміряний у напрямку G145+00.

На рис. 3.15 наведено спектр, отриманий у напрямку, відхиленому на  $8^\circ$  вздовж галактичної широти (у бік негативних галактичних широт) від напрямку GSH 139-03-69 для оцінки протяжності області С II за широтою (південний край оболонки, рис. 1. в роботі [130]). У цьому напрямку РРЛ не було виявлено.

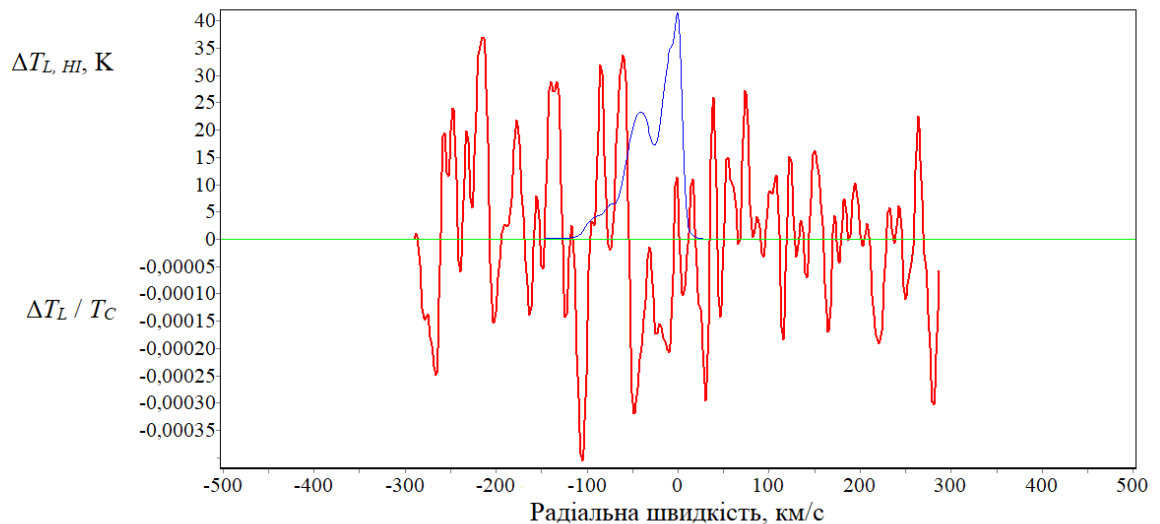


Рис. 3.15. Червона лінія – Усереднений спектр серії РРЛ вуглецю C635 $\alpha$  – C645 $\alpha$ , вимірний у напрямку G137.00-6.00, РРЛ відсутні. Синя лінія – Синтезований спектр лінії H I, вимірний у напрямку G137.00-6.00

### 3.4. З'ясування фізичних параметрів об'єктів за даними РРЛ та порівняння моделей на високих і на низьких частотах

Інтерпретацію результатів, отриманих у роботі [56], було виконано у рамках існуючих на той час моделей середовища формування ліній. Як було зазначено вище, через низьку електронну температуру, запропоновану авторами в [56] (набагато менше 100 K), ними не розглядався механізм заселення рівнів шляхом діелектронної рекомбінації, яка найбільш ефективна для температур близько 100 K.

У роботах [128, 58] обговорювався той факт, що основний внесок до ширини низькочастотних РРЛ вуглецю, що спостерігаються як у напрямку S140, так і в різних напрямках галактичної площини, робить доплерівське розширення. Ширини ліній, отримані нами для напрямків S140 та її окіл, значно менші, ніж ширини ліній, отримані в роботі [56]. Порівнюючи значення ширин ліній, отриманих нами, з ширинами ліній, отриманими для інших напрямків галактичної площини на частотах 34.5 і 76 МГц [58, 59], можна побачити, що ширини мають



дуже схожі значення в термінах радіальних швидкостей. Немає значного розширення лінії при зниженні частоти, що свідчить про домінування доплерівського механізму розширення. Велика (у кілька разів) різниця в ширинах ліній з роботою [56] може бути обумовлена кращою чутливістю ЦК в наших дослідженнях завдяки ширшій смузі аналізу та більшій кількості одночасно спостережуваних переходів з одного боку, так і покращеною процедурою вписування профілю лінії з іншого боку.

У роботі [56] лінії спостерігалися на антені «Північ – Південь» радіотелескопа УТР-2 з інтенсивністю  $10 \pm 3 \cdot 10^{-4}$  відносно континууму. Значення відносної інтенсивності, отримані нами, дещо нижчі. Незначна різниця може бути пов'язана з особливостями процедур видалення базової лінії.

Слід зазначити, що з-за відсутності потужного континуального джерела, яскравісна температура якого перевищує яскравісну температуру галактичного тла, спостережувана відносна інтенсивність ліній не буде відповідати реальній, що має місце в реальних умовах МЗС. У цьому випадку необхідно ввести поправочні коефіцієнти, що враховують співвідношення кутових розмірів досліджуваної області С II та ДН радіотелескопа, а також враховують яскравісні температури фону як попереду області С II, так і позаду неї. Через відсутність даних щодо просторових розмірів області формування ліній та яскравісних температур перед та позаду цієї області, неможливо точно оцінити реальні інтенсивності ліній. Проте можна використовувати інтегральні інтенсивності ліній  $I_L$ , які безпосередньо залежать від фізичних умов у МЗС – електронної температури та електронної густини [17]:

$$I_L = \int \frac{\Delta T_L}{T_C} dv \approx -2 \cdot 10^6 \frac{N_e^2 s}{T_e^{5/2}} b_n \beta_n, \quad (3.1)$$

де  $\frac{\Delta T_L}{T_C}$  – відносна інтенсивність лінії,  $s$  – довжина пробігу крізь область в пк,  $b_n$  – коефіцієнт відхилення заселеності рівнів від ЛТР і  $\beta_n$  – коефіцієнт, що дає поправку на стимульовану емісію. За отриманими спектрами було експериментально визначено інтегральні інтенсивності ліній (таблиця 3.2). Ці

спостережні значення потім були використані для порівняння з модельними значеннями, розрахованими нами за формулою (3.1) шляхом ітераційного аналізу різних комбінацій  $T_e$  та  $N_e$  (таблиця 3.3). Для аналізу було обрано шість комбінацій  $T_e$  і  $N_e$ : 1)  $T_e = 50$  К,  $N_e = 0.01$  см<sup>-3</sup>; 2)  $T_e = 50$  К,  $N_e = 0.1$  см<sup>-3</sup>; 3)  $T_e = 50$  К,  $N_e = 1$  см<sup>-3</sup>; 4)  $T_e = 100$  К,  $N_e = 0.01$  см<sup>-3</sup>; 5)  $T_e = 100$  К,  $N_e = 0.1$  см<sup>-3</sup>; 6)  $T_e = 100$  К,  $N_e = 1$  см<sup>-3</sup>. Також для кожної з шести комбінацій було запропоновано довжину шляху  $s$ , що дорівнює 5, 7 і 10 пк. Окрім значень  $b_n\beta_n$ , що були взяті нами з роботи [131], також були протестовані значення з недавньої роботи [48], де використовувався більш точний метод розв'язання рівнянь статистичної рівноваги та більш точно враховувалися швидкості зіткнень частинок. Результати порівняльного аналізу спостережних і модельних значень для напрямку S140 та інших напрямків наведено в таблиці 3.4. Найкращий збіг спостерігається для комбінацій 1 і 4 для  $b_n\beta_n$  з [131] (узгодження спостерігається при довжині шляху  $s = 10$  пк), а також для комбінації 1 для  $b_n\beta_n$  з [48] (також для  $s = 10$  пк). Для напрямків окіл S140 було виконано аналогічний аналіз. Для напрямку G105.15+2.8 перевагу надано комбінаціям 1 і 4 при  $s = 10$  пк для  $b_n\beta_n$  з [131] і комбінації 1 при  $s = 10$  пк для  $b_n\beta_n$  з [48]. Для напрямку G108.48+7.83 перевагу надано комбінаціям 1 і 4 при  $s = 7$  пк для  $b_n\beta_n$  з [131] і комбінації 1 при  $s = 10$  пк для  $b_n\beta_n$  з [48]. Можна побачити, що лінії утворюються в областях при довжині шляху 10 пк і навіть більше, що цілком очікувано для напрямків, що лежать у галактичній площині, де наявні великі об'єми міжзоряного газу. Для напрямку S140 нами було виявлено основний компонент радіальної швидкості  $-16$  км/с, але присутні ще два, більш слабких компоненти:  $-40$  км/с і  $7$  км/с. Основний компонент у цілому узгоджується з вимірюваннями в [126, 127, 56] з урахуванням відстані до S140 близько 1 кпк. Швидкості  $-16$  і  $7$  км/с, судячи з усього, відповідають місцевому газу в рукаві Оріона, а швидкість  $-40$  км/с відповідає газу в рукаві Персея, який потрапив до широкої ДН антени «Північ – Південь» радіотелескопа УТР-2.

Таблиця 3.3

Розраховані модельні значення інтегральної інтенсивності за формулою (3.1) для шести комбінацій електронної температури та електронної густини, трьох комбінацій довжин шляху та двох комбінацій коефіцієнтів відхилення від ЛТР

$T_e, \text{K}$	$N_e, \text{cm}^{-3}$	$s, \text{пк}$	$b_n \beta_n$	Модельне значення $I_L$	
50	0.01	5	13 (з [131])	-0.7353	
			9 (з [48])	-0.5091	
		7	13 (з [131])	-1.029	
			9 (з [48])	-0.7127	
		10	13 (з [131])	-1.47	
			9 (з [48])	-1.01823	
	0.1	5	13 (з [131])	-73.53	
			3 (з [48])	-16.97	
		7	13 (з [131])	-102.95	
			3 (з [48])	-23.75	
		10	13 (з [131])	-147.077	
			3 (з [48])	-33.94	
	1	5	8 (з [131])	-4525.47	
			1 (з [48])	-565.68	
		7	8 (з [131])	-6335.6	
			1 (з [48])	-791.958	
		10	8 (з [131])	-9050.95	
			1 (з [48])	-1131.36	
	100	0.01	5	75 (з [131])	-0.75
				8 (з [48])	-0.08
			7	75 (з [131])	-1.05
				8 (з [48])	-0.112
			10	75 (з [131])	-1.5
				8 (з [48])	-0.16
0.1		5	70 (з [131])	-70	
			6 (з [48])	-6	
		7	70 (з [131])	-98	
			6 (з [48])	-8.4	
		10	70 (з [131])	-140	
			6 (з [48])	-12	
1		5	28 (з [131])	-2800	
			1 (з [48])	-100	
		7	28 (з [131])	-3920	
			1 (з [48])	-140	
		10	28 (з [131])	-5600	
			1 (з [48])	-200	

Таблиця 3.4

Модельні комбінації фізичних умов, які найкраще відповідають спостережним даним

Напрямок	Спостережувана $I_L$	Найкраща відповідна модельна $I_L$	Найкраща відповідна $T_e$ , К	Найкраща відповідна $N_e$ , $\text{cm}^{-3}$	Найкраща відповідна $s$ , пк	Найкраще відповідні $b_n \beta_n$
S140	-1.54	-1.47	50	0.01	10	13 (з [131])
		-1.5	100	0.01	10	75 (з [131])
		-1.01823	50	0.01	10	9 (з [48])
G105.15+2.8	-2.93	-1.47	50	0.01	10	13 (з [131])
		-1.5	100	0.01	10	75 (з [131])
		-1.01823	50	0.01	10	9 (з [48])
G108.48+7.83	-1.04	-1.029	50	0.01	7	13 (з [131])
		-1.05	100	0.01	7	75 (з [131])
		-1.01823	50	0.01	10	9 (з [48])
G140+00	-1.07	-1.029	50	0.01	7	13 (з [131])
		-1.05	100	0.01	7	75 (з [131])
		-1.01823	50	0.01	10	9 (з [48])
GSH 139-03-69	-0.78	-0.7353	50	0.01	5	13 (з [131])
		-0.75	100	0.01	5	75 (з [131])
		-0.7127	50	0.01	7	9 (з [48])
G145+00	-0.95	-1.029	50	0.01	7	13 (з [131])
		-1.05	100	0.01	7	75 (з [131])
		-1.01823	50	0.01	10	9 (з [48])

У роботі [56] було припущено, що лінії можуть утворюватися у різних класах областей МЗС, у тому числі й в тих, що безпосередньо пов'язані з туманністю S140. Менш вірогідним здавалося формування ліній у місцевій МЗС на промені зору під впливом механізму низькотемпературної діелектронної рекомбінації. Для уточнення моделі області С II ми порівняли наші спектри декаметрових РРЛ вуглецю зі спектрами лінії Н I, синтезованими до кутової роздільної здатності антени «Північ – Південь» УТР-2 в наших спостереженнях для напрямків S140, G105.15+2.8 та G108.48+7.83 (рис. 3.6 – 3.8). Між спектрами обох типів ліній спостерігається хороше узгодження в термінах радіальних швидкостей та ширин ліній, а також інтенсивностей. Для позиції G108.48+7.83 в

РРЛ спостерігається очікуване зменшення інтенсивності лінії через відхилення цієї точки від площини Галактики (відносно точки G105.15+2.8) та зменшення ширини лінії через менший об'єм речовини, що міститься та зміщується в межах широкого променя антени. Для лінії H I ці відмінності також помітні. Таким чином, можна зробити висновок, що в цій частині Галактики можуть існувати великомасштабні комплекси хмар H I, які простягаються до галактичних широт  $b \sim +8^\circ$ . Отже, декаметрові РРЛ, скоріш за все, можуть утворюватися в тому ж самому газі, що й лінія H I, що, знову ж таки, спростовує гіпотезу з [56] про те, що ці лінії утворюються в малорозмірних областях, пов'язаних безпосередньо із самою туманністю S140.

У роботі [128] згадується про те, що ширини РРЛ, виміряні на високих і на низьких частотах у напрямку S140, не узгоджуються між собою. Це може свідчити про те, що високочастотні і низькочастотні лінії утворюються у різних ділянках середовища. Області C II, відповідальні за формування низькочастотних ліній, судячи з усього, не пов'язані безпосередньо з туманністю S140 і областями формування високочастотних ліній. Виходячи з наявності декаметрових РРЛ вуглецю у спектрах на рис. 3.8 і 3.9 в межах ділянки середовища, що перевищує кутовий розмір S140, впливає, що розмір області C II (або областей) у напрямку S140, відповідальних за формування цих ліній, становить більше  $6^\circ$  за схиленням (див. рис. 3.10). Таким чином, було підтверджено припущення, які були зроблені в роботі [128].

Ширина ліній для напрямків GSH 139-03-69, G140+00 і G145+00 була визначена шляхом вписування профіля Гаусса до спостережуваних спектрів (таблиця 3.2). Радіальні швидкості та виміряні ширини ліній у напрямку GSH 139-03-69 не сильно відрізняються від радіальних швидкостей та ширини ліній для напрямків G145+00 та G140+00. Це дає підстави вважати, що спостережувані РРЛ у випадку зв'язку областей C II і хмар H I відслідковують «звичайний», місцевий газ H I, який широкорозповсюджений в галактичній площині і за її межами та не пов'язаний із вкрай холодним газом гігантської оболонки GSH 139-03-69. Якщо порівняти ширину ліній для напрямку

GSH 139-03-69 і для найближчих напрямків в галактичній площині з ширинами високочастотних РРЛ, то ширини низькочастотних ліній у термінах радіальних швидкостей навіть трохи нижчі, ніж у високочастотних ліній, що говорить про домінування механізму доплерівського розширення.

У спектрі для напрямку GSH 139-03-69, наведеному на рис. 3.12, видно декілька компонентів лінії, що мають радіальні швидкості приблизно  $-32$  і  $-7$  км/с. Отже, газ, якому відповідають ці компоненти, лежить у спіральних рукавах Персея та Оріона. У спектрі, отриманому наступного року на рис. 3.13, два вищезгаданих компоненти злилися в один з радіальною швидкістю приблизно  $-19$  км/с, що, очевидно, пов'язано із меншим часом накопичення й, отже, меншою чутливістю при спостереженнях. Проте в обох спектрах також видно слабший та більш вузький компонент поблизу  $-80$  км/с, що відповідає радіальним швидкостям зовнішнього рукава Галактики та результатам спостережень у роботі [130]. Очікується, що цей компонент відповідає поглинанню надзвичайно холодного газу з оболонки GSH 139-03-69. Однак компонент досить слабкий, і для детального аналізу та отримання характеристик необхідно досягти більшої чутливості спостережень.

Дуга на північній межі GSH 139-03-69 у позиції, що відповідає координатам  $l = 145^\circ$ ,  $b = 0^\circ$ , не була чітко визначена у лінії HISA. У спектрі, наведеному на рис. 3.14, видно РРЛ з декількома компонентами, що відповідають радіальним швидкостям приблизно  $-50 \div 0$  км/с та які пов'язані з газом у спіральних відлагодженнях Персея та Оріона. Компонент при швидкості близько  $-80$  км/с, який видно на рис. 3.13 і 3.14, тут відсутній. В позиції з координатами  $l = 137^\circ$ ,  $b = -6^\circ$  низькочастотних РРЛ вуглецю не було виявлено через недостатній час накопичення (рис. 3.15).

За допомогою формули (3.1) для напрямків GSH 139-03-69, G140+00 і G145+00 було виконано ітераційний аналіз фізичних умов, які найкращим чином відповідають експериментальним даним, як і вище для напрямку S140. Для GSH 139-03-69 найкращу відповідність нашим даним отримано для комбінацій 1 і 4 при довжині шляху  $s = 5$  пк для  $b_n\beta_n$  з [131] і комбінації 1 при  $s = 7$  пк для  $b_n\beta_n$  з

[48]. Для напрямку G140+00 найкращу відповідність нашим даним отримано для комбінацій 1 і 4 при довжині шляху  $s = 7$  пк для  $b_n\beta_n$  з [131] і комбінації 1 при  $s = 10$  пк для  $b_n\beta_n$  з [48]. Для напрямку G145+00 найкращу відповідність нашим даним отримано для комбінацій 1 і 4 при довжині шляху  $s = 7$  пк для  $b_n\beta_n$  з [131] і комбінації 1 при  $s = 10$  пк для  $b_n\beta_n$  з [48]. Слід зауважити, що спостережувані радіальні швидкості виявлених ліній дають підстави вважати, що ці лінії виникають у місцевих дифузних хмарах H I в галактичній площині, і що вони не пов'язані з самою оболонкою GSH 139-03-69. Відстань від Сонця до GSH 139-03-69 становить близько 9 кпк, і на даний час поки немає достатньої чутливості вимірювань для того, щоб виконати аналіз компонента  $-80$  км/с, пов'язаного з поглинанням іонізованого газу в цієї оболонки. Довжина шляху, отримана в результаті аналізу для цього напрямку, дещо менша, ніж для сусідніх напрямків G140+00 і G145+00. Однак робити якісь висновки лише на основі цього факту передчасно, оскільки аналіз фізичних умов у даному випадку залежить від вимірюваного значення інтегральної інтенсивності. Щоб отримати більш чітку і достовірну картину, слід оцінити значення електронної температури і електронної густини (і, відповідно, довжини шляху) іншими методами, в тому числі за результатами багаточастотних спостережень.

У лінії HISA спостерігалася лише частина північної дуги оболонки GSH 139-03-69. Тому має сенс досліджувати напрямок GSH 139-03-69 та його околиці шляхом сканування в низькочастотних РРЛ ділянки розмірами  $l \times b = 18^\circ \times 10^\circ$  з центром ділянки відносно GSH 139-03-69 з високими просторовою роздільною здатністю та чутливістю. Також слід використовувати всі доступні дані про лінію HISA у цих напрямках. Судячи з того, що декаметрові РРЛ вуглецю можуть допомогти при розділенні компонентів гарячого та холодного газу з великою точністю (що практично неможливо лише за спостереженнями в лінії H I), можна сподіватись, що вдасться уточнити межі та розміри цього об'єкту та його фізичні властивості.

### 3.5. Висновки по розділу 3

У даному розділі були наведені результати спостережень низькочастотних РРЛ вуглецю на радіотелескопі УТР-2 за допомогою широкосмугових спектроаналізаторів DSP-Z та багатоканального ЦК у напрямку дискретних джерел – ЗНН Cas A та емісійної туманності S140, а також у напрямку протяжної оболонки нейтрального гідрогену GSH 139-03-69. На даних, отриманих за допомогою DSP-Z у напрямку Cas A, було відпрацьовано методологію високочутливих, широкосмугових, багатолінійних радіоспектроскопічних спостережень та обробки даних. Використання DSP-Z дозволяє реєструвати РРЛ вуглецю з високим відношенням сигнал/шум і з меншим часом роботи радіотелескопа. Усереднення великої серії ліній у межах смуги аналізу дозволяє отримувати вкрай високу чутливість вимірювань. Для напрямків S140 та GSH 139-03-69 було виконано аналіз фізичних умов за вимірними характеристиками ліній. Було визначено, що найкращим чином результатам спостережень відповідають модельні значення електронної температури та електронної густини у межах 50 – 100 К та  $0.01 \text{ см}^{-3}$  відповідно, а також значення розміру областей С II вздовж променя зору від 5 пк і вище. Відсутність кореляції між ширинами низькочастотних та високочастотних РРЛ вуглецю в напрямку S140, а також розподіл випромінювання низькочастотних ліній далеко за межами S140 дає підстави вважати, що області формування високочастотних і низькочастотних РРЛ вуглецю в цьому напрямку просторово не пов'язані між собою. Порівняння отриманих нами результатів досліджень РРЛ із даними в лінії Н I у напрямках S140 та GSH 139-03-69 дозволило зробити висновок про те, що області С II, відповідальні за формування спостережуваних РРЛ, скоріш за все, асоційовані з хмарами Н I, що узгоджується із загальноприйнятою «теплою» моделлю областей формування ліній.

Основні положення та результати розділу викладені в публікаціях автора [32, 125].



## РОЗДІЛ 4

### МЕТОДИ ДІАГНОСТИКИ МІЖЗОРЯНОГО СЕРЕДОВИЩА ЗА ДОПОМОГОЮ НИЗЬКОЧАСТОТНИХ РЕКОМБІНАЦІЙНИХ РАДІОЛІНІЙ ВУГЛЕЦЮ

#### 4.1. Актуальність повного огляду неба в низькочастотних РРЛ вуглецю

Області С II можуть існувати як в щільних ОФД поблизу областей Н II, так і в нейтральних компонентах міжзоряного гідрогену (Н I або молекулярного). У роботі [12] ОФД були охарактеризовані як області, де нагрівання і/або хімічні процеси переважно нейтрального газу регулюються далекими УФ-фотонами з енергіями 6 – 13.6 еВ. Оскільки далекі УФ-фотони всюдисущі в ОФД, то за визначенням ці області охоплюють значну долю атомарного газу в Галактиці [див. 132 і посилання в ній]. Щільні ОФД [13] розташовані на поверхні молекулярних хмар і областей Н II, тоді як низькощільні ОФД ( $n_0 \sim 10^3 \text{ см}^{-3}$ ) [13] розташовані в дифузному міжзоряному газі; навколишній потік далекого УФ-випромінювання достатній для контролю за хімічними процесами в такому середовищі і його нагріванням. Області іонізованого вуглецю в щільних ОФД називають «класичними» областями С II. Ці області С II спостережно проявляють себе у вузьких (1 – 10 км/с) лініях вуглецю у випромінюванні на частотах вище 1 ГГц. Були виконані декілька досліджень для розуміння і моделювання випромінювання ліній від таких «класичних» областей [133, 134]. Ці області недоступні спостереженням в низькочастотних РРЛ внаслідок підвищеного розширення тиском ( $\propto v^{-8.2/3}$  [40]) і підвищеної оптичної товщини вільно-вільного континууму ( $\tau \propto v^{-2}$ ). Інший тип областей С II, що називаються «дифузними» областями С II, співіснує з дифузною нейтральною складовою МЗС. Міри емісії таких областей досить малі ( $< 0.1 \text{ пк} \cdot \text{см}^{-6}$  [68]) і, отже, ці області можуть спостерігатися в низькочастотних РРЛ вуглецю в емісії і в поглинанні (внаслідок стимульованої емісії від інвертованих заселеностей). Дифузні області С II, спостережувані на частотах  $\leq 1$  ГГц, далі розглядатимуться в цій роботі.

Як говорилося раніше, дифузні області С II, розташовані в рукаві Персея у напрямку потужного континуального радіоджерела Cas A, були інтенсивно вивчені за допомогою низькочастотних РРЛ вуглецю. Фактично, велика частина нашого розуміння цього типу областей С II була отримана із спостережень у напрямку Cas A. Великий об'єм даних для цього напрямку був використаний при моделюванні умов у випромінюючому лінії газі. Моделі, як було сказано вище, припускають, що РРЛ вуглецю виникають в невеликих, відносно холодних розріджених областях ( $T_e = 35 - 75$  К,  $N_e = 0.05 - 0.1$  см<sup>-3</sup>,  $s \sim 2$  пк [119]) МЗС. Порівняння розподілу РРЛ вуглецю поблизу 327 МГц, спостережуваного на VLA ( $2.7' \times 2.4'$ ) у напрямку Cas A, з розподілом Н I в тому ж напрямку, припускає співіснування областей формування ліній вуглецю з холодним, дифузним компонентом Н I в МЗС [124].

На додаток до області С II у напрямку Cas A, розподіл дифузних областей С II в Галактиці також був досліджений і в протяжних областях. Були проведені огляди поблизу 76 МГц ( $n \sim 441$ ) на 64-метровому радіотелескопі в Парксі [58] і поблизу 34.5 МГц ( $n \sim 580$ ) на Гаурибіданурському радіотелескопі [59] для пошуку РРЛ вуглецю головним чином у внутрішній Галактиці. Ці спостереження призвели до виявлення РРЛ вуглецю в поглинанні від різних напрямків галактичної площини в діапазоні довгот  $l = 340^\circ - 20^\circ$ . Дифузні області С II широко розподілені у внутрішній частині нашої Галактики. Спостереження за межами самої площини показали, що області можуть бути шириною в декілька градусів по галактичній широті. Лінії з виявленнями в позиціях при 34.5 МГц мають свої «двійники» на 327 МГц, виявлених на ORT [59]. Комбінуючи ці спостереження з усіма іншими існуючими спостереженнями РРЛ вуглецю, в роботі [59] було змодельовано випромінювання лінії в різних позиціях галактичної площини. Тоді як моделі з фізичними умовами, подібними до отриманих у напрямку Cas A, можуть узгоджуватися зі спостережуваними даними, не можна виключити і можливість виникнення ліній вуглецю в областях з  $T_e \leq 20$  К [59]. Якщо виявлена низька температура дифузних областей С II, то ці області можуть бути пов'язаними навіть з молекулярними компонентами МЗС [59,

55, 54, 56, 135, 70]. Ці низькотемпературні області можуть бути низькощільними ОФД [13], що сформувалися на поверхнях молекулярних хмар внаслідок іонізації далеким фоновим УФ-випромінюванням. Хоча і були виконані деякі моделювання цих дифузних областей С II з використанням низькочастотних РРЛ, був визначений широкий діапазон простору параметрів, що відповідає наявним спостереженням. Фізичні властивості, розподіл і зв'язок цих областей з іншими компонентами МЗС потребують ретельнішого дослідження. На додаток до РРЛ вуглецю, іонізований вуглець також відстежується за допомогою ІЧ-лінії [С II] 158 мк, про що говорилося вище. Випромінювання лінії [С II] 158 мк в Галактиці було картографовано в роботах [136, 137]. Було визначено, що випромінювання [С II] 158 мк складається з компактних областей випромінювання, пов'язаних з компактними областями Н II [137] і незрозуміло виникаючого дифузного випромінювання. Оскільки і для лінії тонкої структури, і для РРЛ вуглецю потрібно області іонізованого вуглецю, можливо, що обидва типи ліній можуть виникати в одних і тих же областях. У роботі [59] була зроблена спроба порівняння ліній вуглецю і випромінювання [С II] 158 мк, але автори не дійшли яких-небудь певних висновків. У роботі [48] було зроблено припущення, що лінія [С II] 158 мк може служити незалежним засобом уточнення фізичних умов в областях формування РРЛ вуглецю. У роботі [30] відношення інтенсивностей РРЛ вуглецю і лінії [С II] було використано в якості додаткового способу для визначення  $T_e$  області С II.

За час, що пройшов після перших досліджень низькочастотних РРЛ, типи об'єктів, що вивчаються, та їх характеристики значно розширилися. У роботі [17] дано перелік найбільш перспективних напрямів подальших досліджень РРЛ вуглецю, серед яких слід виділити: високочутливі огляди РРЛ вуглецю від областей Н II, темних і дифузних хмар, дослідження РРЛ вуглецю від областей С II, що знаходяться поблизу потужних зірок, дослідження РРЛ від сонячного і зоряного вітрів, дослідження позагалактичних РРЛ вуглецю, повний огляд всього неба в низькочастотних РРЛ, дослідження областей С II, що іонізуються не -УФ-випромінюванням.

Завдяки багаторічному досвіду успішних досліджень низькочастотних РРЛ вуглецю на радіотелескопі УТР-2 і можливості реалізації за допомогою цього інструменту і цифрових спектроаналізаторів DSP-Z у край високої чутливості вимірів, більшість із вищеперелічених завдань можуть бути вирішені. Особливий інтерес викликає проведення повного огляду усього неба в низькочастотних РРЛ вуглецю. У рамках вирішення цієї задачі паралельно можуть вирішуватися завдання високочутливого дослідження дифузних хмар в Галактиці, а також можуть бути вивчені механізми іонізації областей С II не УФ-випромінювання (особливо на великих висотах над площиною Галактики). Цілями повного огляду усього неба в низькочастотних РРЛ вуглецю будуть:

- 1) визначення просторового розподілу областей С II в Галактиці – як у межах площини, так і далеко за її межами в астрономічних об'ємах, що в десятки разів перевищують об'єми усіх попередніх оглядів у низькочастотних РРЛ;
- 2) отримання залежностей характеристик РРЛ вуглецю від частоти і просторової координати, з'ясування за отриманими характеристиками ліній допустимих очікуваних діапазонів фізичних значень областей С II – електронної температури, електронної густини, міри емісії;
- 3) оцінка відстаней до цих областей С II і їх розміру;
- 4) великомасштабні кінематичні характеристики іонізованого газу в Галактиці;
- 5) з'ясування морфологічного зв'язку областей С II з іншими компонентами МЗС.

Усе вищеперелічене доводить необхідність виконання повних оглядів усього неба в низькочастотних РРЛ в рамках з'ясування фізичних, кінематичних і енергетичних характеристик МЗС в Галактиці.

## 4.2. Розрахунок необхідних параметрів експериментів

Для здійснення високочутливого повного огляду усього неба в низькочастотних РРЛ вуглецю необхідні відповідна методологія проведення спостережень та певні параметри приймально-реєструючої апаратури.

Негативними факторами, що можуть впливати на високочутливі оглядові спостереження низькочастотних РРЛ вуглецю, є вкрай низька інтенсивність цих ліній, запруженість частотного діапазону радіотелескопа численними радіозавадами, відсутність яскравих джерел «підсвітки» за межами галактичної площини.

Вибору методології спостережень варто приділити особливу увагу. Вона повинна забезпечити високу чутливість вимірювань для всіх спостережних напрямків, широку смугу аналізу, мінімальні затрати часу спостережень задля досягнення мінімально необхідної чутливості в  $10^{-4}$  відносно континууму, максимальне покриття спостереженнями небесної сфери – ділянок як у межах галактичної площини, так і за її межами, – задля виявлення розподілу газу в Галактиці та його основні характеристики. У зв'язку з цими зауваженнями, найкращою методологією повного огляду неба буде безперервне сканування. При такому методі ДН радіотелескопа орієнтується в зеніт відносно меридіанної площини і відносно обраного схилення за кутом місця. За рахунок добового обертання Землі ДН сканує ділянки небесної сфери вздовж прямого піднесення при майже незмінному схиленні, за 1 хвилину ДН зміщується на чверть градуса (за 4 хвилини – на  $1^\circ$ , за 1 годину – на  $15^\circ$ ). За 23 години 56 хвилин ДН відсканує усю небесну сферу в межах прямих піднесень від  $0^h$  до  $24^h$ , при цьому двічі перетне галактичну площину.

Методологія проведення спостережень шляхом безперервного сканування вирішує проблему забезпечення максимальної чутливості вимірювань шляхом задіяння максимальної ефективної площі радіотелескопа. Повну потужність сигналу  $W$ , що приймається площиною  $A$  в одиничному інтервалі частот  $dv$  можна описати у вигляді

$$W = A \int_{\Omega} I_{\nu}(\theta, \varphi) \cos \theta d\Omega \quad [\text{Вт} \cdot \text{Гц}^{-1}],$$

де  $I_{\nu}$  – інтенсивність сигналу,  $\theta$  та  $\varphi$  – кути, що описують просторовий напрямок приходу сигналу,  $\Omega$  – елемент тілесного кута. Прийемо площину  $A$  як поверхню приймальної антени, орієнтованої у напрямку  $\theta = 0$ . Вона буде являти собою ефективну площу антени  $A_{eff}$ .  $\theta$  є кутом між нормаллю до апертури антени і напрямком на джерело. При  $\theta = 0$  сигнал, що приймається антеною, буде максимальним. Для інших напрямків ( $|\theta| > 0$ ,  $|\varphi| > 0$ ) ефективна площа буде знижуватись з-за ефекту проекції, також буде знижуватись величина сигналу. У випадку орієнтованої в зеніт ДН антени  $\theta = 0$ ,  $\varphi = 0$  і, таким чином, найвищу чутливість можна отримати для спостережень ділянки, що лежить в межах місцевого зеніту. Тому пріоритетним буде виконання огляду в РРЛ саме близзенітної ділянки (рис. 4.1). Слід також зауважити, що на першому етапі аналізувати буде доцільно спочатку дані, отримані у нічний час при найкращій заводській обстановці.

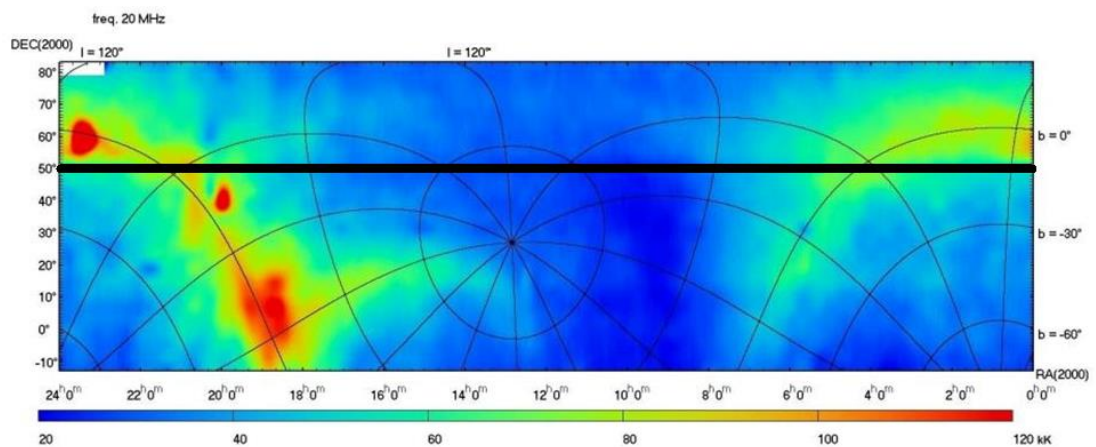


Рис. 4.1. Карта фонового нетеплового радіовипромінювання Галактики, отримана на радіотелескопі УТР-2 для частоти 20 МГц. Синьому кольору відповідають більш холодні ділянки середовища, світло-зеленому та червоному кольорам відповідають ділянки галактичної площини. Чорній смузі відповідає близзенітна ділянка середовища для УТР-2.

Розглянемо вимоги до параметрів реєструючої апаратури. Враховуючи важливість багаточастотності досліджень, спостереження слід проводити у повній

смузі аналізу спектроаналізаторів DSP-Z – від 8 до 33 МГц. Виходячи з найменших ресурсозатратності та часу на обробку даних, доцільно буде виконувати спостереження у спектральному або кореляційному режимах роботи DSP-Z (див. підрозділ 2.3). Для можливості подальшої реалізації найвищої кутової роздільної здатності потрібна інформація щодо зміни фази, яка міститься у фазовому крос-спектрі, тому, виходячи з цього, доцільніше проводити запис даних у кореляційному режимі. Частотна роздільна здатність при цьому становитиме 4 кГц, що є не зовсім оптимальним для прецизійного аналізу профілів ліній, але є достатнім для виявлення просторового розподілу поглинання в РРЛ вуглецю в межах повного огляду. РРЛ є стаціонарним у часі монохроматичним видом випромінювання, тому для їх спостережень не потрібна висока часова роздільна здатність. Значення часової роздільної здатності в 100 мілісекунд буде оптимальним як для скорочення часу на обробку даних, так і для зменшення втрат даних у випадку потрапляння до окремих блоків широкопasmової завади або у випадку спотворення смузи аналізу інтермодуляціями чи стоячими хвилями.

За допомогою підсилювачів перед входами до DSP-Z рівень сигналу слід встановлювати приблизно на 20 дБ вищим, ніж власний шум самих спектроаналізаторів. Це забезпечить загальний динамічний діапазон близько 90 дБ для усієї смузи аналізу.

Низькочастотні РРЛ вуглецю в межах галактичної площини матимуть відносну інтенсивність порядку  $10^{-4}$  від рівня фону. За межами галактичної площини та в нижньому гало РРЛ вуглецю очікувано будуть мати інтенсивність на порядок-два нижчі ( $10^{-5}$  –  $10^{-6}$ ). Розрахуємо мінімально необхідний час накопичення сигналу  $\Delta t$  для реєстрації РРЛ вуглецю з відотною інтенсивністю порядку  $\varepsilon = 10^{-4}$  при частотній роздільній здатності  $\Delta f = 4$  кГц [114]:

$$\Delta t = \frac{1}{\Delta f \varepsilon^2} = \frac{1}{4000 \text{ Гц} \cdot (10^{-4})^2} = 25000 \text{ секунд} \approx 7 \text{ годин.}$$

Для  $\varepsilon = 10^{-5}$   $\Delta t \approx 700$  годин. Значно зменшити такий час накопичення можна при усередненні великої кількості одночасно спостережуваних ліній. Наприклад, при

усередненні двадцяти РРЛ вуглецю  $\Delta t$  для  $\varepsilon = 10^{-5}$  зменшиться у 20 разів і становитиме приблизно 35 годин, що цілком можливо реалізувати.

### 4.3. Обґрунтування стратегії огляду

Як було сказано раніше, до цього часу було виконано два великомасштабних огляди Галактики в низькочастотних РРЛ вуглецю на частотах менше 100 МГц. У першому огляді [58] були досліджені ділянки галактичної площини, де немає яскравих дискретних джерел у діапазоні галактичних довгот від  $l = 340^\circ$  до  $l = 20^\circ$ , а також декілька ділянок за межами площини (з відхиленням по галактичній широті до  $b = +4^\circ$ ) поблизу частоти 76.5 МГц. Була виявлена вкрай протяжна область іонізованого вуглецю з розмірами близько  $40^\circ$  відносно  $l$  і декілька градусів відносно  $b$ . Отримані авторами цієї роботи результати добре узгоджуються з результатами, отриманими в лінії нейтрального гідрогену Н I, що може говорити про зв'язок спостережуваних областей іонізованого вуглецю з розподіленним нейтральним гідрогеном у галактичній площині. Другий огляд [59] було виконано поблизу частоти 34.5 МГц. Спостерігалися ділянки площини в діапазоні довгот від  $l = 342^\circ$  до  $l = 145^\circ$ , а також на деяких інших довготах. Для декількох позицій були досліджені ділянки за межами площини ( $|b| \leq 2.5^\circ$ ). Лінії вдалося виявити лише в 30% спостережуваних позицій, що автори пов'язують із низькою чутливістю вимірювань та відсутністю потужних іонізуючих джерел «підсвічення». Було запропоновано декілька моделей середовища за різних кутових розмірів областей формування ліній ( $2^\circ$ ,  $4^\circ$  або більше  $4^\circ$ ).

Слід зазначити, що два вищенаведені огляди були здебільшого виконані для ділянок середовища, близьких до так званої «внутрішньої» Галактики (ділянок середовища, що лежать поблизу напрямку на центр Галактики, де спостерігається максимум нетеплового радіовипромінювання галактичного тла). Тим не менш, важливо дослідити області середовища як за межами так званої «внутрішньої» Галактики, так й далеко за межами галактичної площини з високою чутливістю та



високим часом накопичення. Порівняння отриманих результатів із даними в лінії нейтрального гідрогену H I та в ІЧ-лінії переходу тонкої структури іона вуглецю [C II] 158 мк допоможе ототожнити зв'язок областей формування низькочастотних вуглецевих ліній з іншими компонентами МЗС.

Як було сказано в розділі 1, був виконаний ряд й інших оглядів в низькочастотних РРЛ вуглецю [64, 65, 73 – 75, 60, 76, 77, 61, 62]. Детальний аналіз спостережень низькочастотних РРЛ вуглецю в Галактиці був виконаний в роботах [73, 74, 75, 60].

У рамках існуючої моделі області С II, відповідальної за формування низькочастотних РРЛ вуглецю, іонізований вуглець передбачається асоційованим з хмарами нейтрального гідрогену H I в Галактиці [68]. Із спостережливої точки зору, газ H I має широкі діапазони значень температур і густин. Використовуючи температуру як міру фізичного стану газової фази, можна «класично» зробити відмінність між молекулярним середовищем ( $T \sim 10$  К), CNM ( $T < 100$ К), WNM ( $T > 1000$  К), WIM ( $10^4$  К) і НІМ ( $10^6$  К). При стовбцевих густинах  $N_{HI} \geq 4 \cdot 10^{20}$  см<sup>-2</sup> може відбуватися перехід з атомарної в молекулярну форму. У напрямку таких щільніших хмар H I спостерігаються молекули від значно кількісних елементів, такі як <sup>12</sup>CO, NH<sub>3</sub>. Молекулярний газ спостерігається також і в напрямку набагато нижчих стовбцевих густин H I, але знаходиться в нестабільній фазі; найчастіше це продукується флуктуаціями температури і густини в ділянках середовища, далеких від ЛТР. В якості основних характеристик холодної газової фази вказують об'ємні густини  $N_{HI} > 10$  см<sup>-3</sup>,  $T < 100$  К і місцеву експоненціальну шкалу висот над площиною Галактики приблизно в 150 пк [138]. Температура і густина суворо пов'язані при розгляді рівноваги по тепловому тиску газу, який для CNM складає близько 2000 К · см<sup>-3</sup>.

Залежно від джерела іонізації та умов середовища в межах галактичної площини, хмари CNM занурені в гарячий іонізований газ WNM. Вертикально газ WNM виявляється по усій небесній сфері ортогонально до площини Галактики з 100%-вим коефіцієнтом заповнення. WNM не має виразної хмарної структури, вона дифузна і може розглядатися у вигляді шару газу. Місцева шкала висот газу

WNM складає приблизно 400 пк. Дослідження WIM за допомогою *Wisconsin Ha Mapper Survey* [139] показали деякі виразні джерела випромінювання H I, які, проте, були накладені на дифузний фон. На додаток до цього, певні заходи дисперсії з оглядів пульсарів дають виразний доказ деякої «атмосфери», що складається з вільних електронів. Широко використовувана модель NE2001 [140] застосовна до вертикальної шкали висот близько 1 кпк, проте відкинувши напрямки при невеликих галактичних широтах, «забруднені» областями H II і спіральними рукавами, значення вертикальної висоти було згодом скореговане до 1.8 кпк [138].

HIM займає лише довколишні до активного зореутворення області, і різні фази заповнюють гало Галактики. В межах гало була виявлена пов'язана фаза H I з низьким коефіцієнтом заповнення. H I знаходиться в динамічній рівновазі з гарячим газом, але повинен розглядатися в цьому випадку як «кламповий», тимчасовий феномен в межах гарячої плазми.

Диференціація по класам газових фаз обумовлюється фізичним фоном, який визначається процесами нагрівання і охолодження в МЗС. Фізичними нагрівальними процесами в МЗС є:

- 1) нагрівання низькоенергетичними космічними променями (щільне молекулярне середовище);
- 2) фотоелектричне нагрівання частками (перехід від CNM до молекулярного середовища);
- 3) фотоелектричне нагрівання фотоіонізацією атомів і молекул (області H II);
- 4) фотоелектричне нагрівання м'якими рентгенівськими променями (WIM, WNM, CNM);
- 5) хімічне нагрівання (щільне молекулярне середовище);
- 6) тепловий обмін між газом і частками (щільне молекулярне середовище);
- 7) гідродинамічне і магнітогідродинамічне нагрівання (WNM, CNM);
- 8) міжзоряні ударні хвилі (WNM, CNM, молекулярне середовище).

Список нагрівальних процесів, наведений вище, відображає два важливі питання. Перше – нагрівання МЗС як функція просторового місця розташування в середовищі і властивості іонізуючого джерела. Друге – ефективність нагрівання впливає на фізичні і хімічні умови в газовій фазі. Далі йтиметься про CNM і WNM, які досліджуються за допомогою лінії H I у випромінюванні.

Питання про охолодження газу нейтрального гідрогену значно простіше. З-за низької об'ємної густини зазвичай для цього розглядають лінії тонкої структури. Найбільш важливою «охолоджувальною» лінією є ІЧ-лінія одноразово іонізованого вуглецю [C II] на хвилі 158 мк. Внаслідок її низького потенціалу іонізації (13.6 eV) і її великої кількості, вуглець переважає в охолодженні нейтрального газу, спостережуваного в лінії H I. Нейтральний кисень є менш істотним охолоджувачем, ніж вуглець із-за його нижчу кількість. Його вклад істотний лише в площині Галактики.

Для атомарної фази нейтральної МЗС рівняння рівноваги між нагріванням і охолодженням може бути записане у вигляді [138]

$$\Gamma_{PE} + \Gamma_{X-ray} = \Lambda_{e,CII} + \Lambda_{H,CI} + \Lambda_{Ly\alpha}, \quad (4.1)$$

де  $\Gamma_{PE}$  – фотоелектричне нагрівання пиловими частками,  $\Gamma_{X-ray}$  – нагрівання м'якими рентгенівськими променями,  $\Lambda_{e,CII}$  – охолодження в лінії тонкої структури за допомогою зіткнень між електронами та іонами вуглецю, і  $\Lambda_{H,CI}$  – охолодження за допомогою зіткнення атомів нейтрального гідрогену і атомів нейтрального вуглецю. Залежно від коефіцієнта виснаження вуглецю на пилових частках ефективність охолодження є функцією умов середовища.

У середовищі з низькою об'ємною густиною  $N < 10 \text{ см}^{-3}$ , типовою для багатьох хмар CNM, нагрівання фотоелектричним впливом на поверхні часток пилу переважає над нагріванням за допомогою рентгенівських променів майже на порядок величини. Його абсолютні значення лежать близько  $\Gamma_{PE} \sim 2 \cdot 10^{-26} \text{ эрг} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Г}^{-1}$  і збільшуються пропорційно об'ємній густині  $N$ . Нагрівання м'якими рентгенівськими променями падає відповідно до  $\sigma \propto E^{-\frac{8}{3}}$  зі збільшенням густини [138].

При низьких об'ємних густинах ( $N < 1 \text{ см}^{-3}$ ), у напрямку високих галактичних широт, стає істотним охолодження лаймановськими фотонами і відповідні метастабільні переходи  $\Lambda_{Ly\alpha}$ . На додаток до цього, тонкий шар газу може охолоджуватися за допомогою рекомбінації вільних електронів на поверхні часток пилу. Обидва процеси мають практично однакову ефективність  $\Lambda \sim 7 \cdot 10^{-27} \text{ ерг} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Г}^{-1}$ . При  $N > 1 \text{ см}^{-3}$  охолодження засобом переходів у нейтральному кисні й іонізованому вуглеці мають ті ж інтенсивності, і порядки величин вищі, ніж у лаймановських фотонів при рекомбінаціях електронів поверхнями часток пилу. Міра охолодження іонізованим вуглецем збільшується із зростанням  $N$ , тоді як міра охолодження нейтральним гідрогеном швидко спадає з  $N$ . Нейтральний кисень досягає прогнозованого піку біля  $N = 1 \text{ см}^{-3}$  з  $\Lambda_{OI} \sim 1 \cdot 10^{-26} \text{ ерг} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Г}^{-1}$  і падає на порядок при  $N = 10 \text{ см}^{-3}$ .

Варто зазначити, що усі ці значення вираховані в припущенні рівноваги по тиску між усіма газовими фазами. Відповідно до цього підходу, густина, тиск і температура взаємозв'язані. Застосовність різних атомарних ліній для охолодження залежить від температури збудження атомів газу.

Оцінюючи різні процеси нагрівання і охолодження як функцію об'ємної густини  $N$ , була виявлена характерна особливість, названа S-подібною кривою між тиском і об'ємною густиною (рис. 4.2). Ця крива допускає в середовищі з низьким тиском (для  $P/k \leq 1000 \text{ К} \cdot \text{см}^{-3}$ ) лише одну теплу (з низькою об'ємною густиною) газову фазу. Одна газова фаза також спостерігалася і у напрямку областей з високим тиском ( $P/k \geq 8000 \text{ К} \cdot \text{см}^{-3}$ ). Між цими значеннями спостерігається рівновага по тиску між гарячим і холодним газом. Стабільні фази можуть існувати тільки при  $\frac{dP}{dN} > 0$ , що розуміє  $T \leq 300 \text{ К}$  для CNM і  $T \geq 5000 \text{ К}$  для WNM. Для  $\frac{dP}{dN} < 0$  або при проміжних температурах газ розглядається як нестабільний або в проміжній формі. Можна позначити це як двофазну структуру МЗС, яка типова для хмар аж до відстаней  $R \leq 18 \text{ кпк}$  від центра Галактики і декілька десятків кілопарсек над диском [141]. При великих радіальних відстанях тиск газу зменшується, фаза CNM при цьому припиняється. Проте

експериментально це не було досі виявлено. За даними різних оглядів (CGPS, SGPS, VGPS) було визначено, що відношення випромінювання до поглинання залишається практично незмінним до  $R \sim 25$  кпк [142]. Це говорить про те, що змішування CNM з WNM може розглядатися як постійне по Галактиці. Представлений вище розгляд з роботи [138] зроблений, здебільшого, для статичної МЗС з нехтуванням динамічними процесами. Статична модель нездатна пояснити особливості CNM далеко за межами диска Галактики.

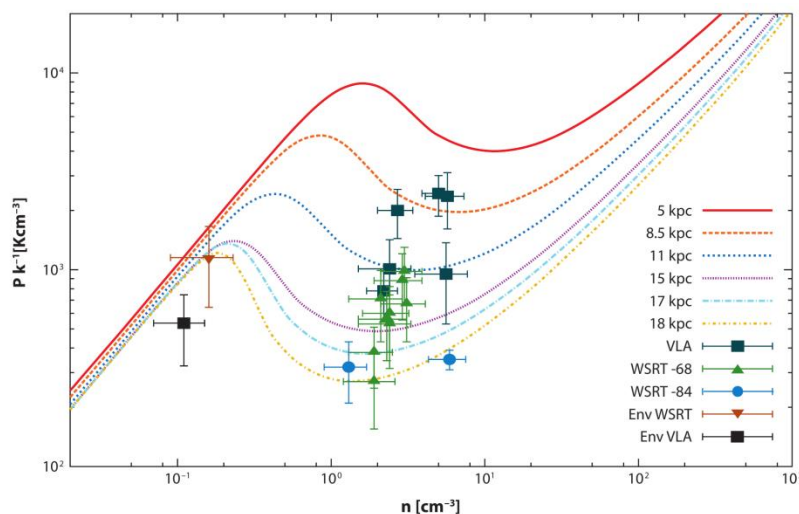


Рис. 4.2. Варіації тиску зі зміною об'ємної густини для клампів H I, що знаходяться в гало, і оболонок (*Env*) при  $13 \text{ кпк} \leq R \leq 15 \text{ кпк}$  і  $2.5 \text{ кпк} \leq |z| \leq 4 \text{ кпк}$ . Кінетичні температури клампів лежать в діапазоні  $150 \text{ К} \leq T_K \leq 700 \text{ К}$ . Рисунок узятий з роботи [138].

У межах галактичного диска тиск газу вищий, при цьому спостерігаються переважно нейтральні хмари, розташовані в межах клампових і листоподібних структур [143, 144]. При  $N > 10^2 \text{ см}^{-3}$  фотоіонізація нейтрального вуглецю перевищує нагрівання м'якими рентгенівськими променями, і її ефективність постійно зростає. Проте, фотоелектричний ефект більш ніж на порядок величини ефективніше, ніж збудження нейтрального гідрогену. У правій частині рівняння (4.1) тонкоструктурні переходи в нейтральний вуглець на довжинах хвиль 609 і 370 мк стають істотними, але вони на порядок менш ефективні, ніж перехід на довжині хвилі 158 мк.

Виходячи з вищесказаного, варто розглянути деякі умови рівноваги, що обумовлюються переважанням теплових ефектів. Це дозволить визначити стовбцеві густини і тепловий тиск. У рамках обмеженого діапазону тисків  $P_{max} < 3 \cdot P_{min}$  при  $P_{min} \approx 2000 \text{ K} \cdot \text{cm}^{-3}$  [145], формується двофазна хмарна структура, що складається з холодного ядра і оболонки з теплого нейтрального газу.

Точні значення температур і густин хмар HI необхідно визначати по вимірах поглинання [129]. Використовуючи досить потужне континуальне джерело за хмарою HI, можна вивести температуру збудження, виходячи з профілів поглинання в режимі ON порівняно з режимом OFF, що допоможе визначити очікуване фонове випромінювання. У найбільш простому двохкомпонентному випадку буде [138]

$$T_B = T_S(1 - e^{-\tau}) + T_{BS}e^{-\tau},$$

де  $T_S$  – спинова температура хмари з оптичною товщиною  $\tau$ ,  $T_{BS}$  – фонові температура, спостережувана за межами хмари, можна нехтувати додатковим фоновим випромінюванням HI. Для визначення структури хмари потрібні спостереження з високими чутливістю і роздільною здатністю.

За межами площини Галактики при  $z > 100$  пк, склад нейтрального гідрогену неоднорідний. Далеко від зоряного диска металевість газу, що знаходиться переважно у фазі WNM, а також вміст пилу знижені. Низькі металевості знижують охолоджувальну здатність газу, тоді як понижений пиловий вміст знижує нагрівальну здатність. Хмари на великих висотах над площиною схильні до позагалактичного фонового випромінювання і випромінювання рентгенівських променів в гало [146, 147], останні самі по собі ефективно іонізують області з низькою об'ємною густиною своїм м'яким рентгенівським випромінюванням. Це можливо внаслідок того, що переріз фотоелектричного поглинання  $\sigma \propto E^{-\frac{8}{3}}$  [148]. Газ в гало з температурою  $T \sim 10^{6.15}$  іонізує нейтральний газ ефективніше, ніж позагалактичний рентгенівський фон з крутими спектрами випромінювання. Вище за енергії

фотонів 280 еВ метали переважають над фотоелектричним поглинанням, тоді як нижче цих енергій іонізації гідроген і гелій є основними фотоелектричними поглиначами [148].

Нейтральні хмари в межах системи диск – гало ( $z \sim 1 - 2$  кпк) представлені у вигляді холодних ядер і теплового оболонкового газу. Така двофазна структура спостерігається у напрямку всіх хмар з середніми швидкостями (IVC) і величезної кількості високошвидкісних хмар (HVC). «Ядра» мають в середньому більші швидкості падіння, ніж оболонки. HVC порівняно з IVC мають не лише великі швидкості, але і менші і слабкіші «ядра». Їх оболонки показують більшу дисперсію швидкостей [138].

Система диск – гало відрізняється від загальноприйнятої двофазної структури. Арки HVC з відстанями, принаймні в декілька кілопарсек, не характеризуються різкими обривами в розподілі стовбцевої густини при деякій межі стовбцевої густини. Це узгоджується з тим, що було виявлено для середніх спектрів рентгенівських фотонів – він різко зростає зі збільшенням енергії рентгенівських фотонів. Різке зростання рентгенівських позагалактичних спектрів внаслідок високих енергій рентгенівських фотонів створює дефіцит м'яких рентгенівських фотонів. Ці фотони, проте, є найефективніше іонізуючими фотонами ( $E < 0.28$  еВ), які переважно продукуються в галактичному гало з вертикальною шкалою висот близько 4 кпк [149]. Відповідно, поблизу межі або в межах розподілу газу в рентгенівському гало Галактики, був віднайдений добре визначуваний поріг нейтральної стовбцевої густини близько  $N_{HI} \sim 10^{19}$  см<sup>-2</sup>, тоді як на великих відстанях від рентгенівської плазми в гало можуть спостерігатися низькі нейтральні стовбцеві густини  $N_{HI} \sim 10^{17}$  см<sup>-2</sup> [150].

Радіально газ HI тягнеться, принаймні, на 30 кпк від центра Галактики [151]. Його азимутна усереднена стовбцева густина крізь диск  $N_n(R)$  характеризується сильним зниженням в межах 3.5 кпк [152] відносно площини уздовж сонячного циклу [153] і майже до 14 кпк [154, 151], і потім експоненціально спадає за межами 14 кпк [151]. Варто зазначити, що усі вказані

вище довжини були масштабовані відносно галактоцентричного радіусу  $R_{\odot} = 8.5$  кпк.

Вертикальна структура розподілу Н І відносно однорідна для  $3.5 \text{ кпк} < R < R_{\odot}$  [153]. У цьому радіальному інтервалі газ Н І лежить в тонкому шарі напівшириною 230 пк (у 2 рази більше напівширини молекулярного газу біля  $R_{\odot}$ ), і його просторово-усереднена чисельна густина може бути апроксимована сумою двох гауссіан і експоненційним «хвостом»

$$\langle N_n \rangle(z) = (0.57 \text{ см}^{-3}) \left\{ 0.70 \exp \left[ - \left( \frac{z}{127 \text{ пк}} \right)^2 \right] + 0.19 \exp \left[ - \left( \frac{z}{318 \text{ пк}} \right)^2 \right] + 0.11 \exp \left( - \frac{|z|}{403 \text{ пк}} \right) \right\}$$

Товщина шару Н І падає до  $\leq 100$  пк в межах 3.5 кпк [128] і збільшується лінійніше з  $R$  за межами  $R_{\odot}$ , досягаючи  $\sim 3$  кпк на зовнішній межі Галактики [151]. Таке значне розширення, очікуване внаслідок різкого зменшення вертикального гравітаційного поля, супроводжується загальною деформацією диска Н І і «гребенем» на його зовнішньому краю. деформація така, що серединна площина шару Н І лежить вище за екваторіальну площину Галактики в першому і в другому квадрантах з максимальним відхиленням приблизно в 1.5 кпк.

Слід зауважити, що на високих галактичних широтах спостерігається переважно газ, розміщений в околі Сонця (300 – 600 пк) при променевих швидкостях близько  $\pm 20$  км/с. Результати дослідження великомасштабного розподілу Н І на високих галактичних широтах були отримані ще в перших роботах з цієї тематики [155 і посилання в ній]. Дані з роботи [156] підтверджують, що середні променеві швидкості газу, що знаходиться в околі Сонця, в основному, негативні, як на південних схиленнях ( $-6.0 \pm 2.4$  км/с), так і на північних ( $-3.7 \pm 3$  км/с). Явною систематичною залежністю променевої швидкості Н І від координати  $|b|$  не спостерігається ні на півночі, ні на півдні. Єдиним розумним поясненням цього явища може служити повільне падіння фонового газу в шарі у напрямку до його серединної площини.



Поява випромінювання Н І на позитивних швидкостях може мати дуже просте пояснення. Річ у тому, що на високих широтах відома великомасштабна структура Н І по променевих швидкостях біля нуля, що називається зазвичай «гребенями» (ridges). У роботі [155] наведені параметри 13 таких утворень, причому більшість з них (11) майже перпендикулярні площині Галактики і деякі досягають широт  $\pm 40^\circ$ . Варто також зазначити, що на відміну від фонового газу, більшість з них має позитивні променеві швидкості.

Середні значення напівширини ліній Н І, зареєстрованих в роботі [156], складають  $13.4 \pm 3.2$  км/с на півдні і  $9.8 \pm 3$  км/с на півночі, ніякої залежності від координат не спостерігалось.

У роботі [155] було виконано дослідження розподілу низькошвидкісного газу Н І на високих галактичних широтах. За винятком потужних ізольованих концентрацій Н І, було виділено 13 протяжних комплексів Н І, що називаються авторами «гребенями» (ridges), більшість з них перпендикулярні екватору і тягнуться до високих галактичних широт. Найбільш інтенсивне випромінювання Н І спостерігалось у напрямку областей Скорпіона – Орфея і Оріону – Тільця – Персея.

Також було виконано порівняння «гребенів» Н І з петлями в радіоконтинуумі на високих галактичних широтах. Це було обумовлено наявністю просторової асоціації випромінювання Н І і радіоконтинууму в напрямку Петлі I (Північного Полярного шпуру) в роботі [157]. Проте, Фейесом і Весселіусом не було отримано хорошої відповідності для інших «гребенів», хоча для Північного Полярного шпура і Петлі IV спостерігався деякий збіг мінімальних і максимальних стовбцевих густин нейтрального гідрогену і випромінювання радіоконтинууму на 820 МГц.

Якщо газ розташований у вигляді шару паралельно площини Галактики, його спостережувана стовбцева густина повинна задовольняти закону косеканса [155]:

$$N_{HI} = \frac{1}{2} \widetilde{\sigma}_{HI} \operatorname{cosec} |b|,$$

де  $\widetilde{\sigma}_{HI}$  – середня поверхнева густина в околі Сонця,

$$\sigma_{HI} = \int_{-\infty}^{+\infty} N_{HI}(z) dz.$$

Більш ранні спостереження Н І виявляли значні відхилення від цього закону, і в роботі Фейеса і Весселіуса була зроблена спроба пояснити ці зміни. Ними був зроблений висновок про те, що відхилення обумовлені наявністю великомасштабних особливостей у випромінюванні Н І, зокрема, пов'язаних і з викривленням диска Н І відносно площини Галактики.

Дослідження високоширотних областей також виконувалися і в лініях тонкої структури іона вуглецю. У роботі [136] описувалося виявлення випромінювання в лінії [С II] 158 мк на високих широтах за допомогою спостережень на спектрометрі FIRAS, встановленому на супутнику COBE. Було з'ясовано, що випромінювання [С II] 158 мк різкіше падає зі збільшенням галактичної широти, ніж інтенсивність континуального ІЧ-випромінювання. Була виявлена хороша кореляція випромінювання в лінії [С II] 158 мк і випромінювання в лінії Н І, і автори дійшли висновків, що лінія [С II] 158 мк формується в CNM при тисках  $P/k = 1000 - 2000 \text{ K} \cdot \text{cm}^{-3}$ .

У роботі [158] повідомлялося про виявлення дифузного випромінювання [С II] 158 мк до високих галактичних широт. При  $|b| \sim 60^\circ$  інтенсивність цієї лінії знаходиться в межах від  $2 \cdot 10^{-7}$  до  $1.5 \cdot 10^{-6} \text{ ерг} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{стерад}^{-1}$ . Порівняння розподілу дифузного випромінювання в лінії [С II] 158 мк із стовбцевою густиною Н І і ІЧ-фона показало деяку кореляцію, але випромінювання [С II] відрізняється від ІЧ- і Н І-випромінювання на високих галактичних широтах. Передбачається, що за випромінювання [С II] 158 мк на високих широтах відповідальна WIM.

Усе вищевказане доводить необхідність виконання оглядових досліджень іонізованого газу в Галактиці – як у різних ділянках галактичної площини, так і за її межами. До теперішнього часу в світі не проводилися огляди за допомогою низькочастотних РРЛ на галактичних широтах вище  $|b| > 10^\circ$ . Причинами цього були недостатня чутливість радіотелескопів, недостатні ефективність,

завадостійкість та широкосмуговість цифрових засобів реєстрації. Для забезпечення високої чутливості вимірювань потрібен радіотелескоп із великою ефективною площею та багатоканальною широкосмуговою приймальною апаратурою.

Український радіотелескоп УТР-2 у повній мірі відповідає усім вимогам для високочутливих, завадостійких спостережень вкрай низькоінтенсивних спектральних ліній. Маючи найбільшу серед низькочастотних радіотелескопів світу ефективну площу, цей інструмент є найкращим в світі для вирішення задач низькочастотної радіоспектроскопії. На ньому успішно були проведені дослідження низькочастотних РРЛ вуглецю в різних напрямках галактичної площини. Лінії були отримані для всіх спостережуваних напрямків. Це дає значну впевненість у тому, що вдасться отримати позитивні результати і в даних спостережень, виконаних шляхом сканування небесної сфери на УТР-2 за допомогою широкосмугових спектроаналізаторів DSP-Z. Усереднення великої кількості одночасно спостережуваних ліній дасть безпрецедентно високу чутливість, й очікувані лінії вдасться зареєструвати з великим співвідношенням сигнал/шум. Вдалий експеримент ще раз доведе високу ефективність української експериментальної бази низькочастотної радіоастрономії, буде отримано вкрай важливий результат в даній проблематиці. Очікується, що розподіл іонізованого газу, який можна зареєструвати за допомогою РРЛ вуглецю на низьких частотах, як поблизу галактичної площини, так і при відхиленнях від неї, буде співпадати з розподілом атомарного гідрогену в лінії H I і розподілом випромінювання від ГЧ-лінії тонкої структури [C II] 158 мк. Проведені раніше дослідження низькочастотних РРЛ вуглецю на УТР-2 в різних напрямках галактичної площини це підтверджують. Дана робота дасть відповідь на узгодженість очікуваних даних РРЛ від високоширотних ділянок із розподілом H I і може бути фундаментом для подальших теоретичних та експериментальних досліджень фізики міжзоряного середовища.

#### 4.4. Розробка алгоритму огляду

Дослідження низькочастотних рекомбінаційних радіоліній вуглецю в напрямках протяжних областей Галактики на радіотелескопі УТР-2 є актуальною та сьогоденною задачею, пов'язаною із визначенням великомасштабної структури іонізованого газу в Галактиці. Завдяки даним, отриманим при зенітній орієнтації ДН (а отже й з максимальною чутливістю) та які зареєстровані за допомогою широкосмугових спектроаналізаторів DSP-Z, існує можливість реалізації високої чутливості при дослідженнях низькочастотних РРЛ.

Найкращим чином для високочутливої радіоспектроскопії підходять дані, отримані в зимові або весняно/осінні періоди, – стан іоносфери в ці пори року найкращий для спостережень. Як було зазначено вище, в першу чергу слід розглядати дані, отримані у вечірні, нічні та ранкові години, коли спостерігається мінімальний рівень індустриальних завад.

Огляди при фіксованій ДН слід виконувати у п'ятипроменевому режимі роботи радіотелескопа УТР-2. Це є важливим моментом, тому що при такому режимі отримуємо п'ять ДН з розмірами  $\alpha$  (пряме піднесення)  $\times$   $\delta$  (схилення) =  $12^\circ \times 20'$ , рознесених на  $30'$  між собою по схиленню, що дозволить проводити порівняння даних з кожного променя задля оцінки кутових розмірів областей С II. У разі великих розмірів цих областей (коли відсутні значні різниці між отриманими інтенсивностями ліній з декількох сусідніх променів), можна усереднити дані з різних променів задля збільшення часу накопичення і чутливості вимірювань. Відповідна ширина смуги, сканованої ДН, відносно схилення становитиме приблизно  $2.5^\circ$ . Спостереження для кожної смуги слід виконувати до накопичення мінімально необхідного часу накопичення  $\Delta t$  для реєстрації РРЛ вуглецю з відносною інтенсивністю  $10^{-4}$  (що, як було розраховано у підрозділі 4.2, складає 7 годин). Але для здійснення спектроскопії МЗС із високим відношенням сигнал/шум цей час треба реалізовувати якомога більшим. Для цього окремі смуги слід спостерігати упродовж не менше місяця реального часу.

Для реєстрації низькочастотних РРЛ вуглецю в отриманих даних були розроблені спеціальні методики обробки даних. Виходячи з того, що дані отримано шляхом безперервного сканування ДН небесної сфери, для початку були визначені точні координати ділянок небесної сфери, що відстежуються діаграмою в будь-який заданий момент часу. Так як заплановано дослідити великомасштабний розподіл іонізованого вуглецю, було розроблено метод, за яким і будуть оброблятися усі наявні дані. Вся небесна сфера ( $0^h - 24^h$  за прямим піднесенням) буде розбита на проміжки одну годину за прямим піднесенням ( $0^h - 1^h$ ,  $1^h - 2^h$ ,  $2^h - 3^h$  і так далі). Дані, отримані кожного сеансу спостережень за період часу, що відповідає скануванню радіотелескопом проміжку небесної сфери від  $0^h$  до  $1^h$  ( $1^h - 2^h$ ,  $2^h - 3^h$  і так далі), будуть усереднені та являтимуть собою великомасштабний розподіл газу в проміжку  $0^h - 1^h$  ( $1^h - 2^h$ ,  $2^h - 3^h$  і так далі). В такий спосіб будуть розбиті усі доступні дані, які потім будуть піддані обробці для усунення впливу завад. Виходячи з того, що сканування за прямим піднесенням буде відбуватися за рахунок обертання Землі, доречніше буде використовувати дані, отримані на антені «Північ – Південь», що орієнтована в меридіанній площині та відповідає за роздільну здатність радіотелескопа відносно схилення. Слід зазначити, що при обраному проміжку усереднення в  $1^h$  відносно прямого піднесення, враховуючи розмір діаграми антени «Північ – Південь» вздовж прямого піднесення ( $12^\circ$ ) та те, що  $1^h$  дорівнює  $15^\circ$ , буде певний відсоток (не більше 30%) перекриття даних між сусідніми проміжками  $0^h - 1^h$  та  $1^h - 2^h$ ,  $1^h - 2^h$  та  $2^h - 3^h$  і так далі (рис. 4.3). Тому при подальшому, більш ретельному вивченні розподілу іонізованого вуглецю коректніше буде аналізувати між собою проміжки, що не перекриваються, наприклад,  $0^h - 1^h$  та  $2^h - 3^h$ ,  $2^h - 3^h$  та  $4^h - 5^h$  і так далі.

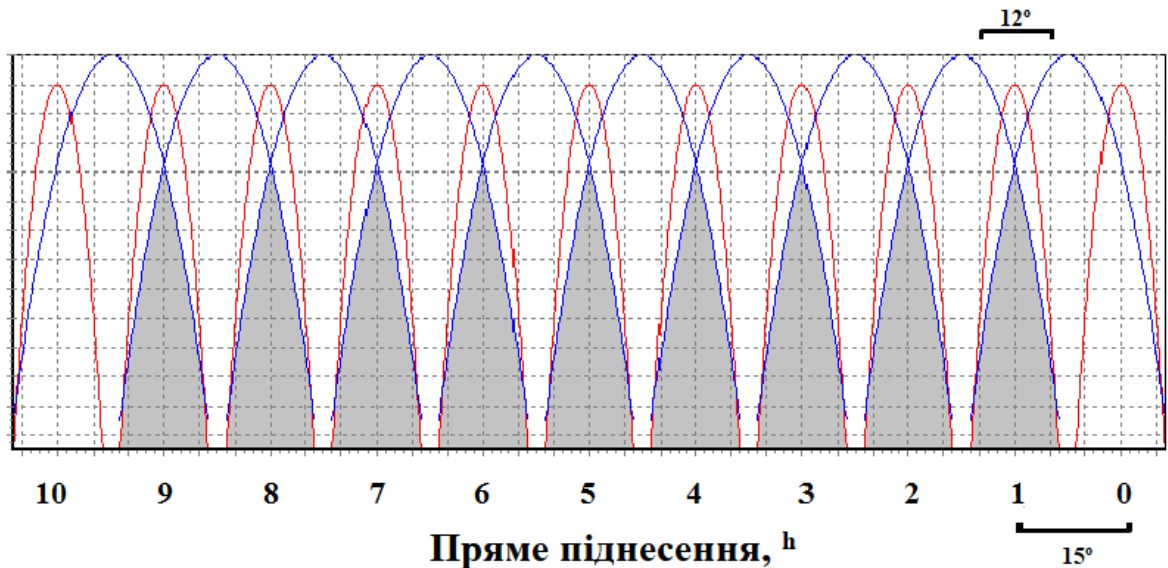


Рис. 4.3. Схематичне зображення розміру діаграми направленості антени «Північ – Південь» радіотелескопа УТР-2 відносно прямого піднесення ( $12^\circ$ ) та ділянок середовища протяжністю в  $1^h$  ( $15^\circ$ ), в яких усереднювались дані. Виділені сірим кольором проміжки відповідають ділянкам, в яких є перекриття даних при русі діаграми направленості між  $0^h - 1^h$ ,  $1^h - 2^h$ ,  $2^h - 3^h$  і т.д.

На першому етапі блоки даних із присутніми широкосмуговими та/або високоінтенсивними завадами й спотвореннями сигналу в смузі спектроаналізатора будуть виключатися з подальшого аналізу в момент по годинного розбиття даних. На другому етапі вузькосмугові та відносно низькоінтенсивні завади поканально видалятимуться із отриманих спектрів. Після корекції базової лінії шляхом сплайнової інтерполяції та нормування будуть отримані підсумкові спектри без впливу континууму та інструментального відклику. РРЛ вуглецю слід усереднювати в спектрах у частотних смугах з різною шириною (1, 2 або 4 МГц) відносно обраних центральних частот. Отримані спектри після урахування частотного зсуву центроїда лінії перераховуватимуться в терміни радіальної швидкості.

Характеристики низькочастотних РРЛ (відносна інтенсивність та ширина лінії), виміряні на багатьох частотах, будуть далі використані для визначення параметрів середовища, де ці лінії сформувались. Зіставлення спектрів

рекомбінаційних радіоліній вуглецю із спектрами інших типів спектральних ліній (наприклад, лінії нейтрального гідрогену H I, лінії тонкої структури іону вуглецю [C II] 158 мк тощо) дасть можливість оцінити зв'язок областей, де сформувалися рекомбінаційні радіолінії, з іншими компонентами міжзоряного середовища.

#### 4.5. Висновки по розділу 4

У розділі було доведено актуальність та сьогоденність оглядових великомасштабних досліджень іонізованого вуглецю в Галактиці за даними низькочастотних РРЛ вуглецю на радіотелескопі УТР-2 за допомогою широкосмугових цифрових спектроаналізаторів DSP-Z. Оглядові дослідження дозволять оцінити великомасштабний розподіл газу в різних ділянках галактичного МЗС, визначити характеристики зареєстрованих при огляді РРЛ вуглецю, дослідити їх залежності від частоти та від просторової координати, оцінити параметри фізичних умов у газі, де сформувались ці лінії, оцінити відстані до цього газу та розміри самих областей С II, дослідити можливий морфологічний зв'язок іонізованого вуглецю в різних ділянках Галактики з іншими компонентами МЗС. Найкращим чином для оглядових досліджень підходить метод безперервного сканування фіксованою ДН радіотелескопу за рахунок добового обертання Землі, при якому можна отримувати дані як для ділянок в межах або поблизу галактичної площини, так і далеко за її межами – на високих галактичних широтах. Було доведено обґрунтування обраної методології вкрай великими можливостями, які відкриває проведення огляду в низькочастотних РРЛ вуглецю – дослідження кінематичних, енергетичних та хімічних властивостей МЗС. У рамках обраної методології спостережень була розроблена спеціальна обробки спектроскопічних даних, що передбачає дискретизацію усіх отриманих оглядових даних у межах обраних ділянок відносно прямого піднесення, при цьому розмір ділянки відносно схилення для одного променя антени «Північ – Південь» буде складати 20', а при застосуванні п'ятипроменевого режиму – приблизно 2.5°. Далі дані будуть оброблятися для

усунення впливу завад на спектри, при цьому в першу чергу будуть оброблятися дані, що відповідають нічному часу спостережень, коли реєструється мінімальний рівень завад. В оброблених спектрах буде усунутий вплив континуума та інструментальний відклик, після чого будуть отримані висновкові спектри у термінах радіальних швидкостей, які будуть порівняні із аналогічними спектрами від тих же ділянок середовища, отриманими у лінії H I. Також буде проаналізовано просторовий розподіл, отриманий у низькочастотних РРЛ вуглецю та в лінії тонкої структури [C II] 158 мк.

Основні положення розділу викладені у публікаціях автора [106, 107].



## РОЗДІЛ 5

### ОГЛЯД ДІЛЯНОК ГАЛАКТИКИ В РЕЖИМІ ВЕЛИКОМАСШТАБНОГО ВИВЧЕННЯ РОЗПОДІЛУ ІОНІЗОВАНОГО ВУГЛЕЦЮ

#### 5.1. Реалізація обраної методології спостережень та апробація спостережної концепції «десять в одному»

Оглядова методологія радіоспектроскопічних спостережень реалізувалась на радіотелескопі УТР-2 починаючи з 2015 року. Спочатку були отримані дані для близзенітної смуги ( $\delta = +49^\circ$ ), для якої було отримано найбільший обсяг даних (близько тисячі годин реальних спостережень, обсяг записаних файлів «.jds» у кореляційному режимі понад 10 терабайт). Після цього проводилися спостереження для смуг, що лежать відносно ЗНН Cas A ( $\delta = +58^\circ$  та  $\delta = +59^\circ$ ), радіогалактик Персей А і Лебідь А ( $\delta = +41^\circ$ ), Крабоподібної туманності ( $\delta = +22^\circ$ ), радіогалактики NGC 3521 ( $\delta = 0^\circ$ ). Обсяг даних, отриманий для поза зенітних смуг, сумарно складає близько 10 терабайт. Спостереження проводилися у п'ятипроменевому режимі роботи радіотелескопа УТР-2, запис вівся у кореляційному режимі для подальших досліджень з високою кутовою роздільною здатністю окремих ділянок, що зареєстровані в огляді з великою кутовою роздільною здатністю (до  $12^\circ$  у широкому перерізі). Під час оглядових спостережень вівся неперервний моніторинг стану функціонування радіотелескопа УТР-2, на меті якого було запобігання потрапляння до огляду даних, спотворених потраплянням до смуги аналізу DSP-Z ефектів внаслідок збоїв у системі фазування (випадкове перемкнення реле у фазообертачах верхніх ярусів), системі підсилення та у фідерному тракті на всьому шляху сигналу з антен до цифрових реєстраторів. Також після кожного сеансу спостережень ретельно вивчалися лог-файли. Перед або після кожного сеансу виконувалось багатоступеневе калібрування із здійсненням генератора шуму задля оцінки похибок у рівні потужності в межах смуги аналізу.

Протягом 60-х – 70-х років минулого століття головною науковою програмою УТР-2 були оглядові спостереження компактних позагалактичних радіоджерел. Фонове радіовипромінювання і протяжні об'єкти з кутовим розміром  $> 30'$  відфільтровувались вже на етапі вимірювань, що притаманне ідеології кореляційного радіотелескопа. Разом з тим у зв'язку з високою кутовою роздільною здатністю, широким частотним діапазоном, великою ефективною площею було цікаво дослідити і протяжні радіоджерела різної природи. Було запропоновано оригінальну методику відновлення низьких (починаючи з «нульових») просторових частот майже без додаткових засобів. Основа методики полягала у додатковій модуляції сигналів від малих субрешіток (по 30 елементів кожна), які знаходилися б у центральній частині антени «Північ – Південь». Це еквівалентно адитивному додаванню сигналу від цих малих субрешіток до загального кореляційного відгуку радіотелескопа УТР-2. У результаті, до 1990-х років було успішно досліджено близько 10 протяжних радіоджерел. Однак обмеження експериментальних ресурсів, яке мало місце у ті часи, стримувало розвиток цих досліджень. Нижче наведені апаратно-методичні недоліки, що заважали високоякісним спостереженням різних типів низькочастотного космічного радіовипромінювання:

1. Фіксована стала часу накопичення  $\sim 30$  с, якої було недостатньо для чутливості, але достатньо для впливу імпульсних завад;
2. Фіксована смуга реєстрації каналу  $\Delta f = 10$  кГц, якої було недостатньо для чутливості, але достатньо для впливу імпульсних завад;
3. Мала кількість каналів  $N = 30$ ;
4. Відсутність суцільного частотного діапазону (6 смуг  $\times \sim 1$  МГц);
5. Модуляційний режим роботи радіотелескопа, при якому половину часу спостережень був відсутній сигнал від радіоджерела;
6. Малий динамічний діапазон приймачів;
7. Малий радіометричний виграш;
8. Відсутність оцінок впливу ефекту плутанини;
9. Відсутність заповнення низьких просторових частот;

10. Високий рівень бічних пелюсток;
11. Високий рівень дифракційних пелюсток на частотах більше 20 МГц;
12. Низькі апаратні можливості пристроїв обробки сигналів;
13. Відсутність широкосмугових амплітудних і фазових крос-спектрів;
14. Відсутність власних моделей небесної сфери за фоном та потужним джерелам;
15. Недосконала система антенного підсилення;
16. Значна нерівномірність коефіцієнту передачі;
17. Значні втрати сигналу у фідерній системі на шляху до підсилення;
18. Складна система калібрування для абсолютних вимірювань;
19. Відсутність сучасних розрахунків параметрів великих антен;
20. Відсутність універсальної системи реєстрації для одночасних спостережень різних типів сигналів;
21. Недосконале ручне налагоджування приймачів від завад;
22. Відсутність статистики завад на історичних масштабах.

Слід зазначити, що запропонована у підрозділі 4.4 стратегія та методологія проведення радіоспектроскопічних оглядових спостережень на радіотелескопі УТР-2 шляхом сканування ділянок небесної сфери за рахунок добового обертання Землі може бути застосована і для спостережень інших типів радіовипромінювання на декаметрових хвилях. При виконанні огляду з зенітною орієнтацією ДН реалізуються найкращі параметри радіотелескопа – найвища чутливість, максимальна ефективна площа, мінімальний рівень бічних пелюсток. При обранні оптимальних параметрів роботи радіотелескопа і цифрових спектроаналізаторів DSP-Z (частотна роздільна здатність не гірше 4 кГц, часова роздільна здатність не гірше 100 мс, запис автоспектрів антен «Північ – Південь» та «Захід – Схід», а також амплітудних і фазових крос-спектрів), отримані вищеназваним методом дані окрім досліджень монохроматичного випромінювання у спектральних лініях можуть бути використані для досліджень багатьох особливостей континуального, імпульсного, спорадичного,

поляризованого випромінювання. Така методологія отримала назву «10 в 1» та дозволяє виконувати дослідження:

1. РРЛ різних типів;
2. спектральних ліній від ранніх космологічних епох;
3. областей Н II у поглинанні;
4. ЗНН у поглинанні;
5. середніх та індивідуальних радіоімпульсів пульсарів, їх тонку та поляризаційну структуру;
6. радіотранзєнтів;
7. іоносферних та міжпланетних мерехтінь;
8. радіовипромінювання Сонця;
9. радіовипромінювання Юпітера;
10. спалахуючих зорь.

Розглянемо нижче більш детально особливості та переваги досліджень за методологією «10 в 1» для деяких з вищеназваних об'єктів.

#### *Області Н II у поглинанні*

Розглянемо емісійну туманність (область Н II), яка характеризується параметрами  $T_e$ ,  $N_e$ ,  $EM$  ( $\sim N_e^2 L$ ), кутовим розміром  $\theta_s$ , що відповідає тілесному куту  $\Omega_s$ . Туманність знаходиться на певній відстані від Сонця  $R_\odot$ , за нею присутній фон з яскравісною температурою  $T_B$ , а перед нею – фон з яскравісною температурою  $T_F$  (у більшості випадків  $T_B > T_F$ ). Туманність сканується радіотелескопом, що має ДН  $P(x)$  з шириною  $\theta_a$ . Важливо, щоб  $\theta_a$  було меншим за  $\theta_s$ , а власні шуми набагато меншими, ніж антенна температура, в якій домінує галактичний фон. Такі умови повністю реалізуються радіотелескопом УТР-2. Відповідний антенний відгук радіотелескопа у загальному випадку є згорткою виду

$$T_A(x) = T_{SYS} + \int_{x_{min}}^{x_{max}} T_b(x) \cdot P(x - x') dx'.$$

Розглянемо середовище двох типів:

1. Гаряча плазма з  $T_e = 10000 \text{ K}$ ,  $N_e = 10 \div 1000 \text{ cm}^{-3}$ .
2. Холодна плазма з  $T_e = 50 \text{ K}$ ,  $N_e = 0.1 \div 10 \text{ cm}^{-3}$ .

Проведемо розрахунки  $\tau_c$  для високих ( $\nu = 1000 \text{ МГц}$ ) та низьких ( $\nu = 20 \text{ МГц}$ ) частот. Результати розрахунків показані на рис. 5.1 для всіх наведених вище параметрів плазми (ліворуч).

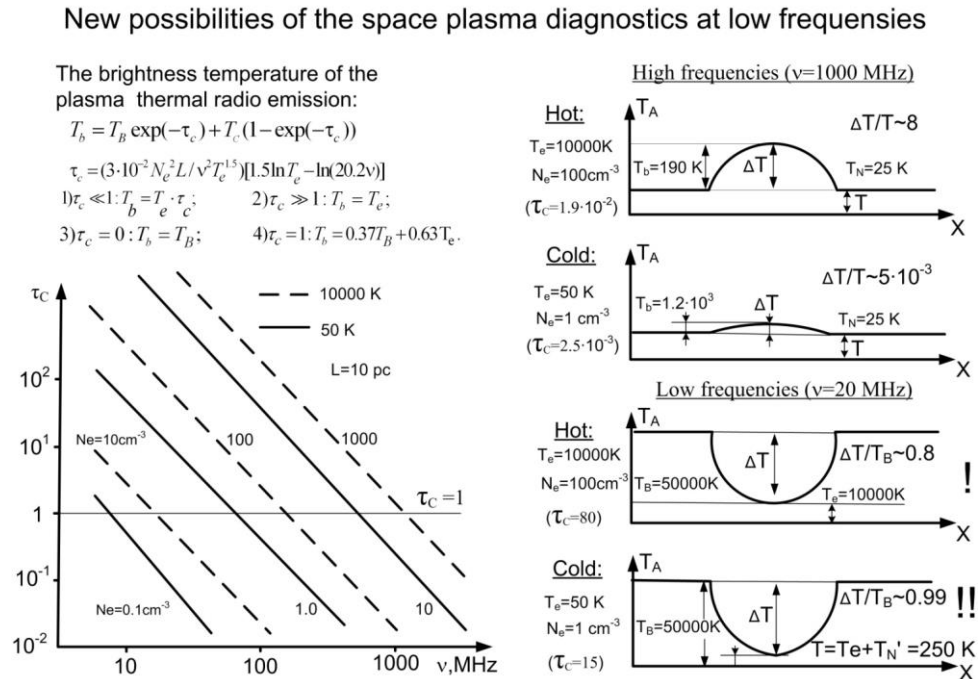


Рис. 5.1. Нові можливості діагностування космічної плазми на низьких частотах. Рисунок узятий з роботи [159]

Як видно із правої частини рис. 5.1, гаряча плазма на високих частотах детектується в емісії за умови, якщо шумова температура радіотелескопа досить низька. У випадку холодної міжзоряної частково-іонізованої плазми, яка є основною складовою частиною галактичних рукавів, відповідну емісію зареєструвати неможливо. У той самий час, для тієї ж самої плазми, але на низьких частотах, бачимо дуже цікавий результат – для об’єктів і з гарячою, і з холодною плазмою спостереження повинні дати дуже надійний позитивний результат. При цьому в обох випадках об’єкти будуть проявлятися не в типовій емісії, як на високих частотах, а у вигляді сигналу «від’ємної» полярності, тобто у поглинанні на тлі галактичного нетеплового радіовипромінювання. Ці нові передбачені і розраховані в проекті ефекти відкривають нові можливості у

діагностиці міжзоряної плазми, у тому числі, вельми холодної і слабо іонізованої, яка відіграє ключову роль у перших кроках процесів зореутворення.

### *ЗНН*

ЗНН – одні з найбільш цікавих для астрономічних досліджень класів об'єктів Галактики, у тому числі, й для низькочастотної радіоастрономії. Ці об'єкти є важливим джерелом впливу на МЗС і відображають певні кроки у глобальній зоряній еволюції. Під час вибуху наднової має місце збурення, іонізація та нагрів навколишнього середовища за рахунок різноманітних фізичних процесів – виділення кінетичної енергії (ударні хвилі та турбулентність), фотонів (головним чином, УФ-, рентгенівським та гамма-випромінюванням), а також космічними променями (релятивістські електрони та важкі іони). Крім того в цей час відбувається збагачення МЗС важкими елементами, які утворюються на попередніх етапах еволюції зір у ході термоядерних реакцій. Урешті-решт, з'являється астрофізичний об'єкт із нетепловим радіовипромінюванням і ступеневим спектром, із яскравісною температурою та густиною потоку виду

$$T_b \sim \nu^{-2.5} ; S_b \sim \nu^{-0.5} .$$

Зараз у Галактиці спостерігається декілька сотень ЗНН (якщо врахувати слабкі об'єкти, то їх кількість значно більша). Їхні спектри були всеохоплююче досліджені у широкому діапазоні частот.

Свої особливості дають низькочастотні спостереження, які показують «завал» спектру ЗНН із зменшенням частоти. Головною причиною цього є поглинання у міжзоряній плазмі (холодній чи гарячій) на промені зору до об'єкта, коли оптична товщина об'єму плазми ненульова. Виходячи з цього, дослідження ЗНН також є одним із методів діагностики плазми на низьких частотах.

Однак більш цікавим є аналіз середовища у безпосередній близькості до залишків наднових. Як відмічалось вище, у цих областях повинен бути суттєвий вплив різних типів енергії при вибуху, перш за все, іонізація попередньо нейтральної речовини. Теоретичні оцінки показують можливість виникнення так

званих «реліктових» областей НІІ. Таким чином, можливо проводити пошук та дослідження відповідних туманностей на периферії вибірки достатньо протяжних залишків наднових. Подібні зони НІІ повинні проявлятися у вигляді інтервалів «від'ємної» полярності на тлі фонового радіовипромінювання у безпосередній близькості до області нетеплової емісії власне залишку наднової. При цьому радіотелескоп повинен мати високі кутову роздільну здатність ( $\theta_\alpha < \theta_s$ ) та чутливість до протяжних та компактних структур (тобто достатню чутливість за густиною потоку і яскравісною температурою), що забезпечується найкращим чином радіотелескопом УТР-2. Варто зауважити, що на високих радіочастотах подібні зони задетектувати складно, оскільки важко розділити нетеплову емісію залишку наднової і теплове випромінювання (також в емісії) «реліктової» області НІІ.

Низькочастотна діагностика плазми поблизу ЗНН відкриває нові можливості у вивченні зоряного населення певних етапів еволюції та їх взаємодії із міжзоряною речовиною.

### *Пульсари*

Широко смугове імпульсне випромінювання пульсарів є вкрай ефективним засобом діагностики космічної плазми, зокрема МЗС. Імпульси пульсарів дещо спотворюються при розповсюдженні крізь холодну міжзоряну плазму під дією ефектів розповсюдження. Аналіз цих спотворень надає змогу отримати інформацію про параметри плазми, крізь яку проходять імпульси на шляху до спостерігача. Основними наслідками поширення імпульсних сигналів в космічній плазмі є ефект дисперсійної затримки цих сигналів, ефект Фарадея (обертання площини лінійної поляризації вздовж променя зору), ефект розсіювання, ефект мерехтінь, рефракція, синхротронне самопоглинання та деякі інші ефекти.

### *Сонце та Юпітер*

Сонце та Юпітер знаходяться не в міжзоряному, а в міжпланетному середовищі. Однак останнє також є космічною плазмою, і її теж важливо вивчати,

особливо – методами низькочастотної радіоастрономії. Відомо, що низькочастотні дослідження стикаються з певними проблемами, які зумовлені високою яскравісною температурою галактичного фону, інтенсивними радіозавадами, негативним впливом середовища розповсюдження космічних радіохвиль – МЗС, міжпланетного середовища, іоносфери. П'ятдесятирічний досвід досліджень на радіотелескопах УТР-2, УРАН, ГУРТ в діапазоні 8 – 80 МГц дозволив вдосконалити засоби і методи спостережень, що ліквідують або зменшують вказані проблеми, включаючи вплив середовища. Однак також можливе вирішення «зворотної задачі», тобто розглядати міжпланетне середовище та іоносферу не як завадний фактор, а як об'єкт досліджень із з'ясуванням фізичних параметрів, типових для плазмових теорій і експериментів. Варто зазначити, що у комплексній програмі досліджень з радіоастрономії в Україні подібні напрями вже реалізовувались. Це – програми міжпланетних та іоносферних мерехтінь радіовипромінювання, що спостерігаються у напрямках далеких космічних радіоджерел. Пропонується розвинути ці дослідження, оскільки зондування міжзоряної плазми проводиться подібними джерелами нетеплового радіовипромінювання.

Широкосмугова реєстрація космічних радіосигналів на низьких частотах не лише суттєво покращує флуктуаційну чутливість вимірювань. Як показали розрахунки, принаймні, є ще чотири позитивних обставини, які принципово покращують можливості запропонованих досліджень:

1. зменшення рівня бічних пелюсток ДН Т-подібного радіотелескопа при усередненні у смузі частотозалежної функції виду  $\sin(x)/x$ ;
2. зменшення рівня дифракційних пелюсток, що виникають, коли відстань між антенними елементами  $d > \lambda/2$ , а положення пелюсток у просторі залежить від частоти;
3. зменшення рівня коливань потужності у трактах телескопа, які виникають внаслідок імпедансної непогодженості його елементів та мають період, що залежить від частоти.



Ці три фактори разом породжують четверту дуже важливу перевагу широкосмугових спостережень:

4. суттєве покращення чутливості за ефектом плутанини, який визначається шириною ДН, усіма типами бічних пелюсток, різноманітними радіозавадами, а також розподілом позагалактичних континуальних радіоджерел.

Оцінки вказаного ефекту з урахуванням широкосмугових можливостей, а також нових даних по підрахункам радіоджерел, показують, що чутливість за ефектом плутанини може бути покращена приблизно на порядок і досягати  $\Delta S_{min(conf)} \sim 1$  Ян.

Дуже важливим для якісного вивчення міжзоряних утворень, як у поглинанні, так і в емісії, особливо, протяжних структур з розмірами  $\theta_s > 0.5^\circ$  є забезпечення якісної реєстрації усього спектру просторових частот. Для цього просторово-частотна характеристика радіотелескопа повинна бути максимально широкою (висока кутова роздільна здатність  $\theta_a$ ), не мати «провалів», особливо в області низьких (включаючи «нульові») просторових частот (чутливість до ізотропних та протяжних структур). Просторова частота  $\chi_\lambda$  – це кількість довжин хвиль, що вкладаються на апертурі антени. Зворотне значення  $\theta_a = 1/\chi_\lambda$  (радіан) – є оцінкою кута ДН або кутовий розмір радіоджерела.

Відомою особливістю кореляційних Т-подібних радіотелескопів, до яких відноситься й УТР-2 і в яких є певна відстань між двома ортогональними антенами – є їхня нечутливість до «нульових» і низьких просторових частот. Усі попередні дослідження фону та протяжних об'єктів, що проводилися за допомогою аналогової апаратури, вимагали досить складних і неточних режимів роботи і калібрувань. Однак нещодавно було запропоновано і впроваджено нову методологію відновлення низьких просторових частот, яка абсолютно не потребує ніяких додаткових вимірювань, втручань у структуру радіотелескопа та складних схем калібрування. При цьому використовуються ті ж самі широкосмугові цифрові аналізатори із реєстрацією спектрів потужності антен і комплексних крос-спектрів [159].

У рамках першої експериментальної реалізації методології «10 в 1» у березні 2021 року були проведені спостереження на УТР-2 шляхом сканування ділянки небесної сфери за рахунок обертання Землі при зенітній орієнтації ДН у меридианній площині і при відхиленні ДН приблизно на  $8^\circ$  у бік від'ємних схилень ( $\delta = +41^\circ$ ). Було застосовано багатопроменевий режим роботи УТР-2, реєстрація з центрального (третього) та першого променів велася двома комплектами спектроаналізаторів DSP-Z у смузі 8.25 – 33 МГц при частотній роздільній здатності 4 кГц, часовій роздільній здатності 100 мс. При такій орієнтації ДН до центрального променя радіотелескопа потрапляла зокрема радіогалактика 3С84 (Персей А (Per A)), а до першого променя, відхиленого від центрального приблизно на  $1^\circ$  у бік від'ємних схилень, – радіогалактика 3С405 (Лебідь А (Cyg A)) [160].

На рис. 5.2 – 5.5 наведено радіоспектроскопічні результати, отримані в наборі даних для смуги небесної сфери шириною  $2.5^\circ$  відносно схилення  $\delta = +41^\circ$ . На рис. 5.2 та 5.3 наведено спектри усередненої серії РРЛ вуглецю С650 $\alpha$  – С689 $\alpha$ , отриманий на антені «Північ – Південь» для ділянок протяжністю  $1^h$  та  $2^h$  за прямим сходженням з центром відносно Cyg A для центральної частоти 22 МГц (місцевий час проходження ДН Cyg A – 08:00). Для більшої ділянки шляхом усереднення 40  $\alpha$ -переходів вдалося зареєструвати лінію з відносною інтенсивністю близько  $1.4 \cdot 10^{-3}$ . На рис. 5.4 та 5.5 наведені аналогічні спектри, отримані на антені «Захід – Схід». Вдалося зареєструвати РРЛ в обох ділянках з інтенсивностями  $1.8 \cdot 10^{-3}$  для ділянки протяжністю  $1^h$  та  $1.1 \cdot 10^{-3}$  для ділянки протяжністю  $2^h$ . Зареєстровані лінії мають ширини близько 4 кГц та радіальні швидкості в діапазоні  $-50 \div 0$  км/с, що відповідає формуванню ліній у спіральних відгалуженнях Персея та Оріона. Слід зазначити, що Cyg A знаходиться при галактичній широті  $b = +6^\circ$ , й успішна реєстрація РРЛ за межами галактичної площини підтверджує правильність та ефективність обраної методології спостережень.

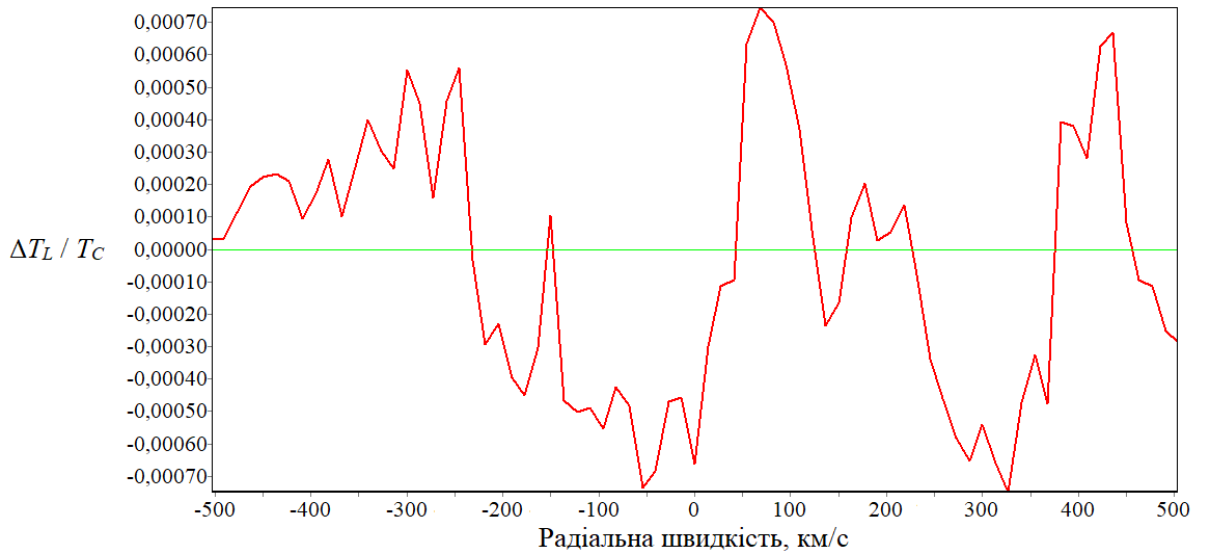


Рис. 5.2. Усереднений спектр серії декаметрових РРЛ вуглецю С650α–С689α у смузі частот 20 – 23.9 МГц, виміряний у напрямку Суг А у ділянці небесної сфери протяжністю 1<sup>h</sup> на антені «Північ – Південь» радіотелескопа УТР-2. Ефективний час накопичення становить 130 годин.

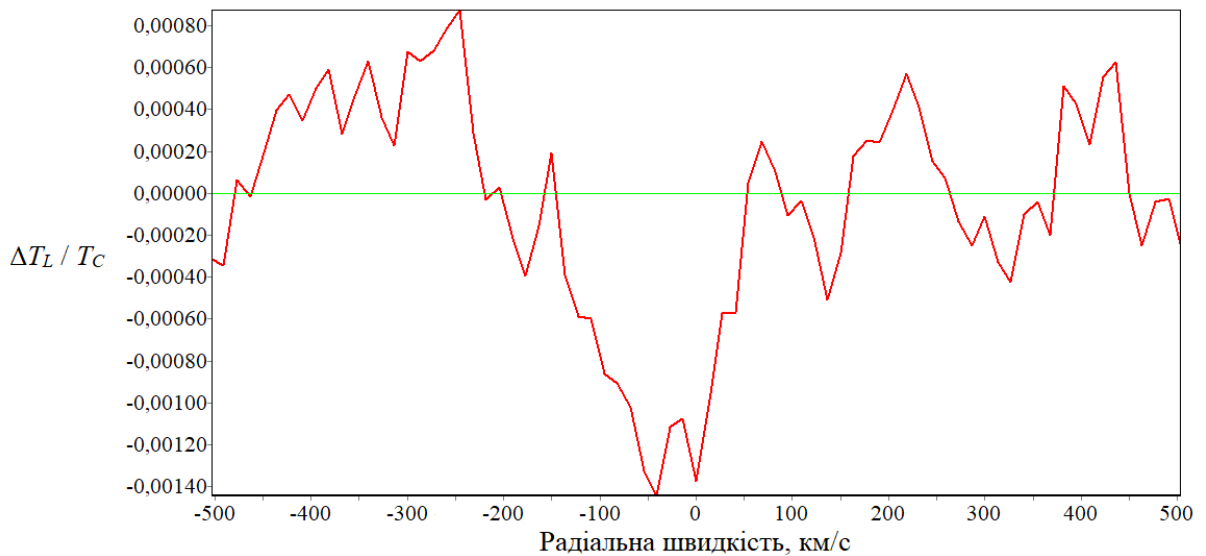


Рис. 5.3. Усереднений спектр серії декаметрових РРЛ вуглецю С650α–С689α у смузі частот 20 – 23.9 МГц, виміряний у напрямку Суг А у ділянці небесної сфери протяжністю 2<sup>h</sup> на антені «Північ – Південь» радіотелескопа УТР-2. Ефективний час накопичення становить 300 годин.

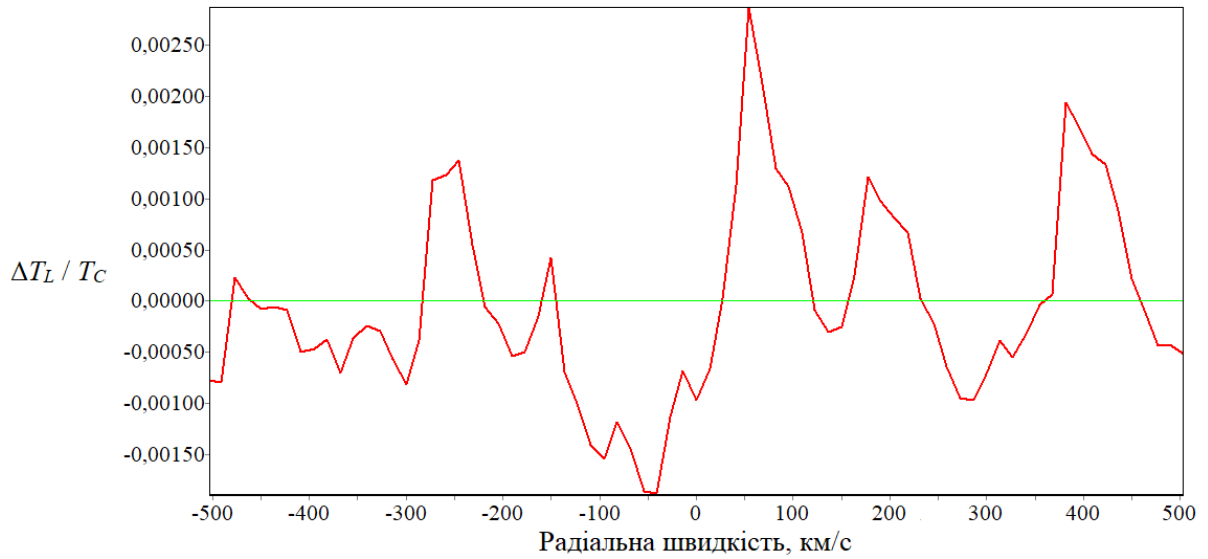


Рис. 5.4. Усереднений спектр серії декаметрових РРЛ вуглецю С650α–С689α у смузі частот 20 – 23.9 МГц, вимірний у напрямку Суг А у ділянці небесної сфери протяжністю 1<sup>h</sup> на антені «Захід – Схід» радіотелескопа УТР-2. Ефективний час накопичення становить 145 годин.

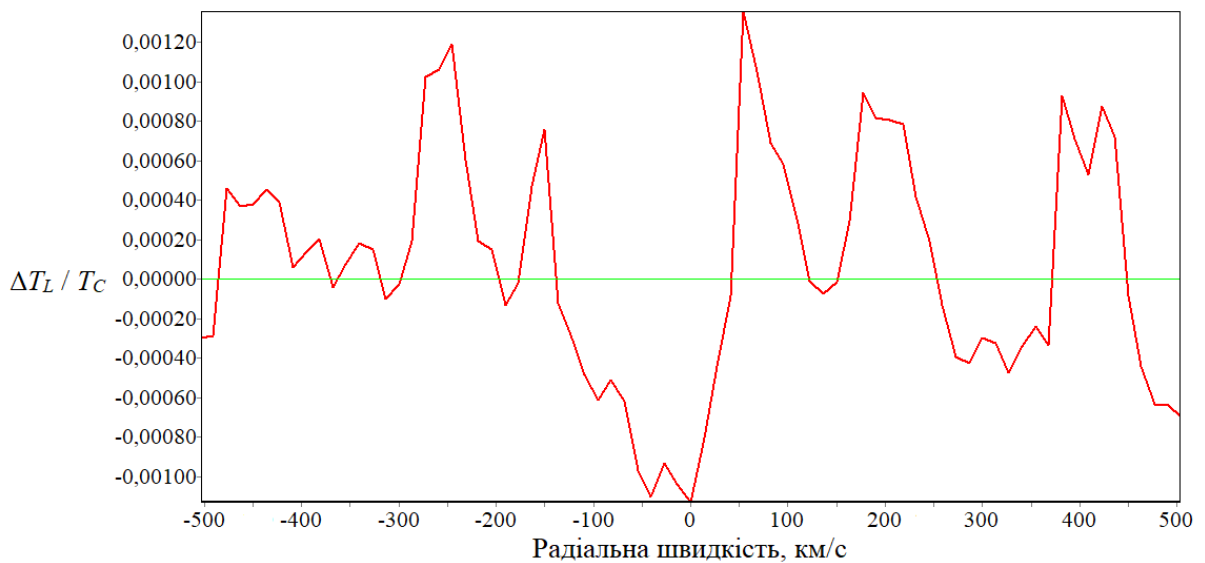


Рис. 5.5. Усереднений спектр серії декаметрових РРЛ вуглецю С650α–С689α у смузі частот 20 – 23.9 МГц, вимірний у напрямку Суг А у ділянці небесної сфери протяжністю 2<sup>h</sup> на антені «Захід – Схід» радіотелескопа УТР-2. Ефективний час накопичення становить 290 годин.

На рис. 5.6 наведено перший високоякісний спектр повної потужності реєстрованого антеною «Захід – Схід» радіотелескопа УТР-2 випромінювання для смуги відносно  $\delta = +41^\circ$ . Видно очевидні зміни рівня сигналу, що спричинені двома добовими проходами променя радіотелескопу через галактичну площину. Видно також, що на сканах мають місце потужні імпульсні завади. Певним чином це унікальний запис – чудово видно прохід радіогалактики 3С405, більш слабке джерело – радіогалактику 3С84 і безліч більш слабких радіоджерел. Такої високої якості запису на антені «Захід – Схід» всього за один скан раніше не було досягнуто, а стало можливим завдяки впровадженню у якості реєструючих пристроїв спектроаналізаторів DSP-Z та використанню вищеописаної методології оглядових спостережень з фіксованою ДН.

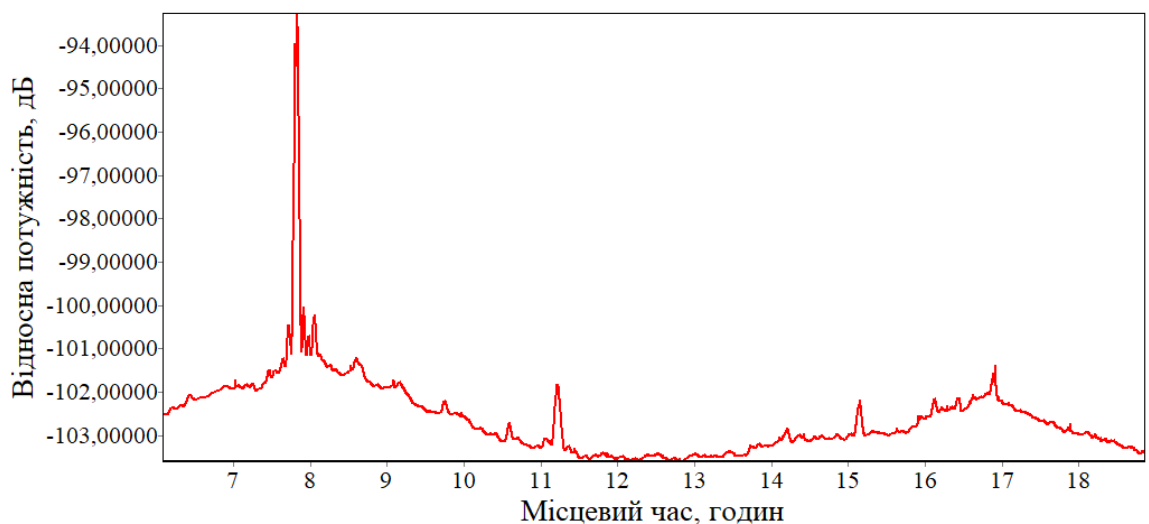


Рис. 5.6. Змінення повної потужності зареєстрованого радіовипромінювання на частоті 25 МГц при проході 3С405 и 3С84 через ДН «Захід – Схід» радіотелескопа УТР-2 протягом 18 березня 2021 року ( $\Delta F = 1$  МГц,  $\Delta t = 10$  сек). Час кульмінації 3С405 – близько 07:50 місцевого часу, час кульмінації 3С84 – близько 15:05 місцевого часу.

Таким чином, є можливість реалізації методології універсальних комплексних спостережень, яка дозволяє:

1. вивчати континуальне фонове нетеплове радіовипромінювання Галактики;
2. проводити каталогізацію галактичних та позагалактичних компактних радіоджерел;
3. реалізувати абсолютні та відносні високоточні вимірювання густин потоків радіоджерел різних типів, включаючи зміни їх параметрів у часі;
4. забезпечити моніторингову і пошукову радіоспектроскопію міжзоряного середовища в спектральних лініях різних типів;
5. проводити спостереження за допомогою антен, що мають різні геометрію, розмір і форму діаграми спрямованості, просторово-частотну характеристику.

Варто зазначити, що усі ці принципово різні астрофізичні задачі можуть вирішуватись одночасно. Раніше ніколи в світі запропонована методологія не використовувалась.

## 5.2. Спостереження близенітної ділянки Північного неба

У ході виконання роботи за допомогою низькочастотних РРЛ вуглецю були проведені спостереження близенітної ділянки Північного неба (місцевий зеніт відповідає  $\delta = +49^\circ$ ). При цьому ДН радіотелескопа охоплювала різні ділянки Галактики – як поблизу галактичної площини, так і за її межами, що в десятки разів перевищує усі раніше досліджені в низькочастотних РРЛ обсяги простору. Спостереження були виконані за вищевказаною методикою оглядових спостережень за рахунок добового обертання Землі в діапазоні частот 8.25 – 33 МГц за допомогою спектроаналізаторів DSP-Z.

Спостереження проводились у багатопроменевому режимі роботи радіотелескопа УТР-2. На ПК за допомогою DSP-Z записувалися дані з першого, другого, третього (центрального) та п'ятого променів. Відстань між сусідніми променями складає близько 30' відносно схилення, розмір ДН кожного променя антени «Північ – Південь» складала  $\alpha$  (пряме піднесення)  $\times$   $\delta$  (схилення) =  $12^\circ \times$

20'. Виходячи з малої відстані між променями, можна некогерентно усереднити дані усіх наявних променів, тим самим буде отримано синтезовану діаграму направленості розміром приблизно  $\alpha \times \delta = 12^\circ \times 2.5^\circ$ , що цілком буде задовольняти меті роботи – вивчення великомасштабного розподілу газу, а також дозволить в декілька разів збільшити співвідношення сигнал/шум.

Для аналізу було використано набір спостережних даних, отриманих у період від 13 до 25 грудня 2015 року. Частотна роздільна здатність складала приблизно 4 кГц. Мінімальному рівню завад (нічному часу) відповідали ділянки прямих піднесень з 1<sup>h</sup> ( $l = 124^\circ$ ;  $b = -13^\circ$ ) до 9<sup>h</sup> ( $l = 169^\circ$ ;  $b = +41^\circ$ ), для яких й було виконано аналіз (рис. 5.7).

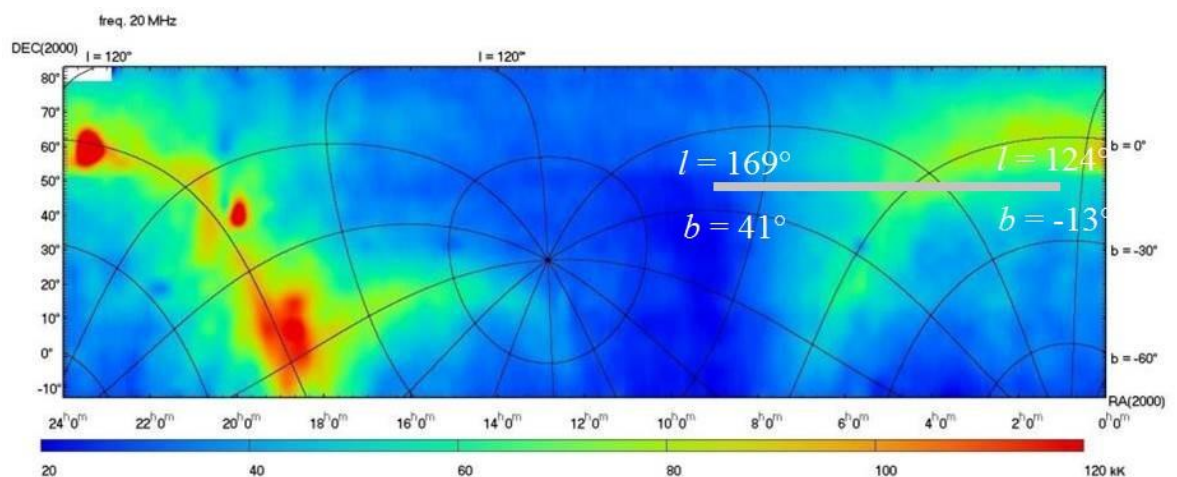


Рис. 5.7. Положення досліджуваних ділянок 1<sup>h</sup> ( $l = 124^\circ$ ;  $b = -13^\circ$ ) – 9<sup>h</sup> ( $l = 169^\circ$ ;  $b = +41^\circ$ ) відносно площини Галактики на мапі радіоконтинууму.

Отримані після обробки даних, описаної у підрозділі 4.4, спектри низькочастотних РРЛ вуглецю були усереднені в частотних смугах 18 – 22 та 23 – 27 відносно обраних центральних частот 20 та 25 МГц (при цьому до смуги 18 – 22 МГц потрапляє 47 РРЛ, до смуги 23 – 27 потрапляє 35 РРЛ). Усереднення великої кількості ліній дозволило досягти рекордно високої чутливості спостережень (порядку  $10^{-5}$ ). Отримані спектри після урахування частотного зсуву центроїда лінії були перераховані в терміни радіальної швидкості.

На рис. 5.8 – 5.10 наведено отримані підсумкові спектри, отримані на центральному промені антени «Північ – Південь» УТР-2 ( $\alpha \times \delta = 12^\circ \times 20'$ ), в яких

вдалося зареєструвати низькочастотні РРЛ вуглецю, що є результатом усереднення сорока семи РРЛ у частотному діапазоні 18 – 22 МГц. Відповідно, при такому усередненні чутливість вимірювань збільшується майже у 7 разів.

Вперше вдалося надійно зареєструвати низькочастотні РРЛ вуглецю на галактичних широтах  $-7^\circ < b < +13^\circ$  (в проміжках від  $3^h$  до  $6^h$  відносно прямого піднесення). Слід зазначити, що шляхом збільшення часу накопичення чутливість вимірювань значно підвищиться і вдасться зареєструвати низькочастотні РРЛ вуглецю, що відповідають більшим галактичним широтам. Спостережні характеристики зареєстрованих ліній наведені в таблиці 5.1. Зауважимо, що у другому й третьому стовбцях таблиці 5.1 для спрощення в дужках вказані відносні середня довгота  $\bar{l}$  й середня широта  $\bar{b}$  для відповідного проміжку вздовж прямого піднесення.

Для даного набору даних була застосована вдосконалена методика обробки даних, яка включала в себе видалення завад у кожному окремому файлі даних, де завада зазвичай займає 1 – 2 частотних канали. Якщо відразу усереднювати файли без видалення завад на цьому етапі, наприклад, за повний проміжок в  $1^h$  за прямим піднесенням, є ймовірність, що завада буде «дрейфувати» в інші канали, при цьому в усередненому файлі вона буде займати до 10 каналів, тому видалення завади в такій великій кількості каналів може спотворити АЧХ або ж самі канали з РРЛ.



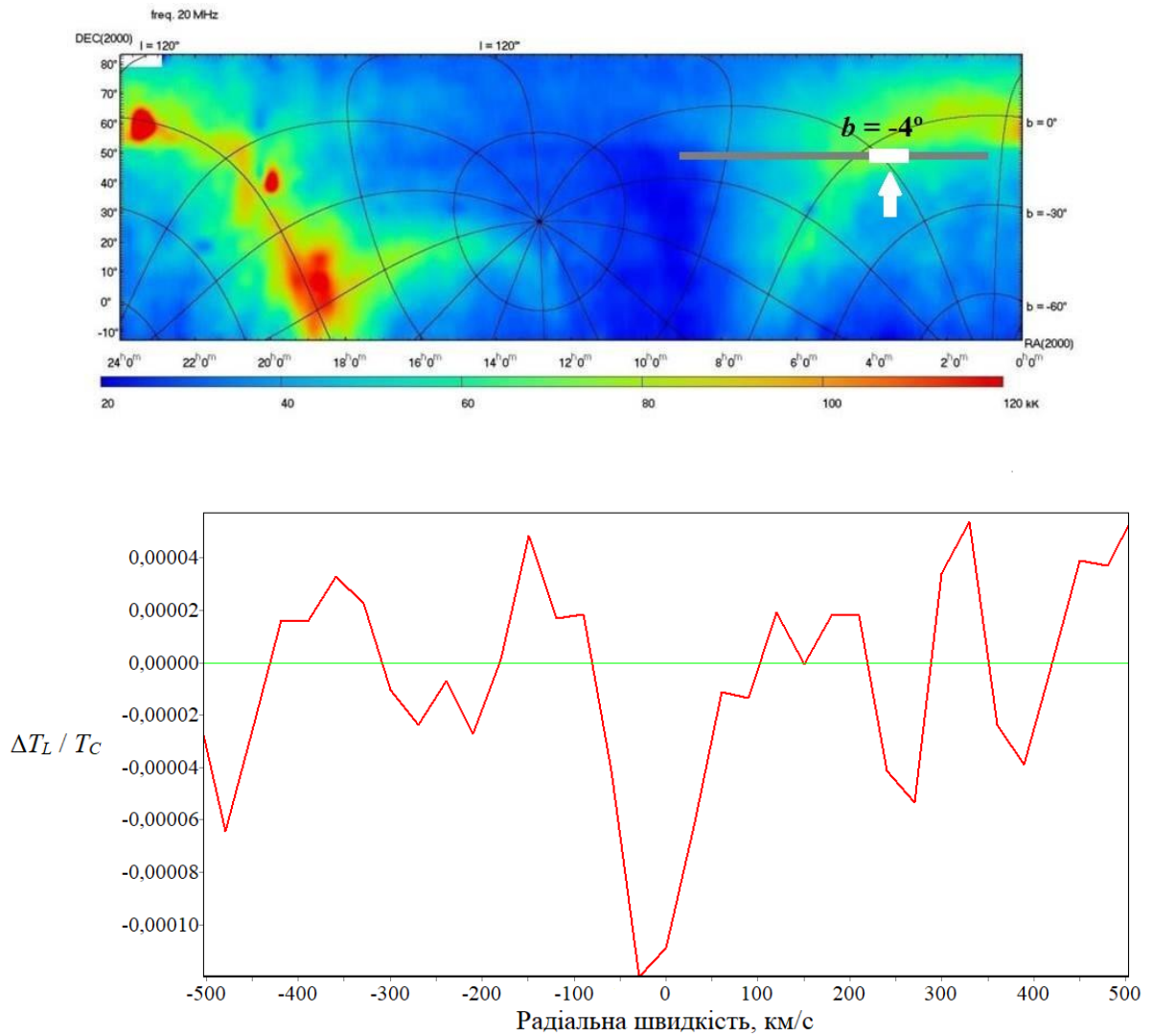


Рис. 5.8. Зверху (тут і далі) – Положення ділянки простору, в котрій усереднено спектр, відносно галактичної площини. Знизу (тут і далі) – Спектр усередненої серії РРЛ С668 – С714α (47 ліній, діапазон 18 – 22 МГц) у ділянці простору  $3^{\text{h}} - 4^{\text{h}}$  ( $\bar{l} = 147^{\circ}$ ;  $\bar{b} = -4^{\circ}$ ). Ефективний час накопичення складає приблизно 385 годин, місцевий час проходження ділянки діаграмою антени близько 20:45 – 21:45.

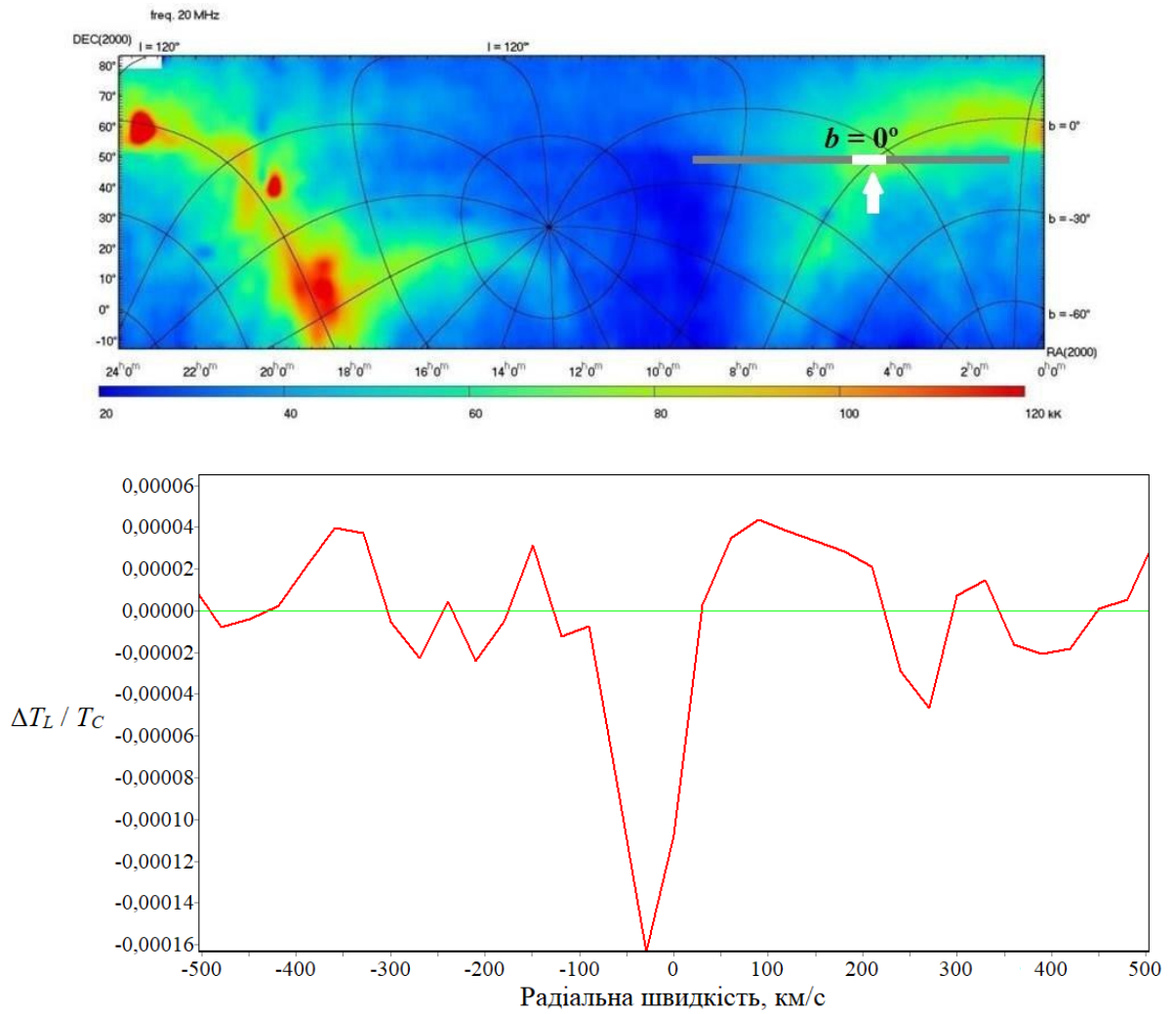


Рис. 5.9. Спектр усередненої серії РРЛ С668 – С714 $\alpha$  (47 ліній, діапазон 18 – 22 МГц) у ділянці простору 4<sup>h</sup> – 5<sup>h</sup> ( $\bar{l} = 155^\circ$ ;  $\bar{b} = 0^\circ$ ). Ефективний час накопичення складає приблизно 503 години, місцевий час проходження ділянки діаграмою антени близько 21:45 – 22:45.

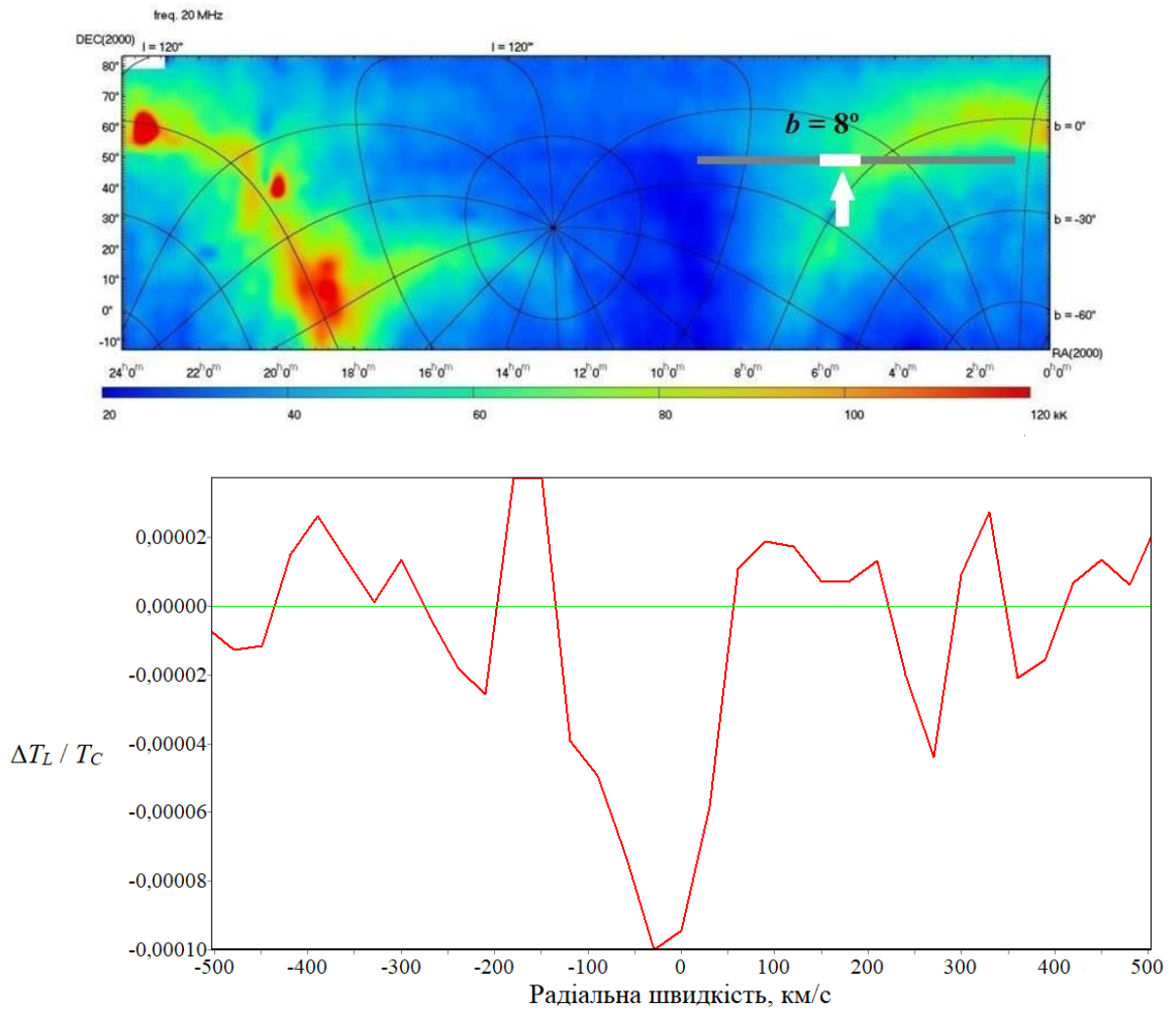


Рис. 5.10. Спектр усередненої серії РРЛ С668 – С714α (47 ліній, діапазон 18 – 22 МГц) у ділянці простору  $5^h - 6^h$  ( $\bar{l} = 160^\circ$ ;  $\bar{b} = 8^\circ$ ). Ефективний час накопичення складає приблизно 493 години, місцевий час проходження ділянки діаграмою антени близько 22:45 – 23:45.

Таблиця 5.1

Отримані спостережні характеристики усередненої серії РРЛ вуглецю  
C668 – C714 $\alpha$  (18 – 22 МГц)

Проміжок відносно прямого піднесення	Довготний діапазон (середня довгота $\bar{l}$ )	Широтний діапазон (середня широта $\bar{b}$ )	Відносна інтенсивність $\frac{\Delta T_L}{T_C}$ ( $\times 10^{-4}$ )	Ширина лінії
1 <sup>h</sup> – 2 <sup>h</sup>	124°50'36",1 ÷ 134°42'36",1 (129°)	-13°17'26",6 ÷ -11°40'22",7 (-12°)	–	–
2 <sup>h</sup> – 3 <sup>h</sup>	134°42'36",1 ÷ 143°49'52",9 (139°)	-11°40'22",7 ÷ -7°52'19",5 (-9°)	–	–
3 <sup>h</sup> – 4 <sup>h</sup>	143°49'52",9 ÷ 151°47'42",7 (147°)	-7°52'19",5 ÷ -2°12'29",3 (-4°)	1.2	68 км/с (4.53 кГц)
4 <sup>h</sup> – 5 <sup>h</sup>	151°47'42",7 ÷ 158°23'33",1 (155°)	-2°12'29",3 ÷ 4°56'52",8 (0°)	1.6	59 км/с (3.93 кГц)
5 <sup>h</sup> – 6 <sup>h</sup>	158°23'33",1 ÷ 163°33'54",4 (160°)	4°56'52",8 ÷ 13°12'36",8 (8°)	1.0	103 км/с (6.87 кГц)
6 <sup>h</sup> – 7 <sup>h</sup>	163°33'54",4 ÷ 167°14'40",08	13°12'36",8 ÷ 22°14'54",3	–	–

	(165°)	(18°)		
7 <sup>h</sup> – 8 <sup>h</sup>	167°14'40",08 ÷ 169°17'41",9 (168°)	22°14'54",3 ÷ 31°44'56",7 (27°)	–	–
8 <sup>h</sup> – 9 <sup>h</sup>	169°17'41",9 ÷ 169°16'5' (169°)	31°44'56",7 ÷ 41°24'25",5 (36°)	–	–

Очікувалось, що спостережувані у ділянках як у межах площини Галактики, так і за її межами лінії будуть мати радіальні швидкості близько 0 км/с, що відповідає місцевому газу в околі Сонця. Але зареєстрована у межах площини лінія має радіальну швидкість, що відповідає газу в рукаві Персея, який міг потрапити до широкої відносно прямого піднесення ДН УТР-2. За межами галактичної площини радіальні швидкості, як і очікувалось, близьконульові. Викликає зацікавлення факт значного збільшення ширин ліній при відхиленні від галактичної площини. Це може бути обумовленим потраплянням різношвидкісного високоширотного газу в ДН радіотелескопа. Інтенсивності зареєстрованих ліній очікувано зменшуються із відхиленням від галактичної площини, що добре видно на рис. 5.11. Як видно з нижніх панелей в кожному рисунку, шумові флуктуації спектрів зростають при значних відхиленнях від галактичної площини ( $0.6 \times 10^{-4}$  при  $b = +30^\circ$  та  $0.2 \times 10^{-4}$  при  $b = 0^\circ$ ). Відповідно, для більш високоширотних напрямків треба підвищувати чутливість вимірювань шляхом збільшення часу накопичення або/та усередненням ще більшої кількості спостережуваних РРЛ.

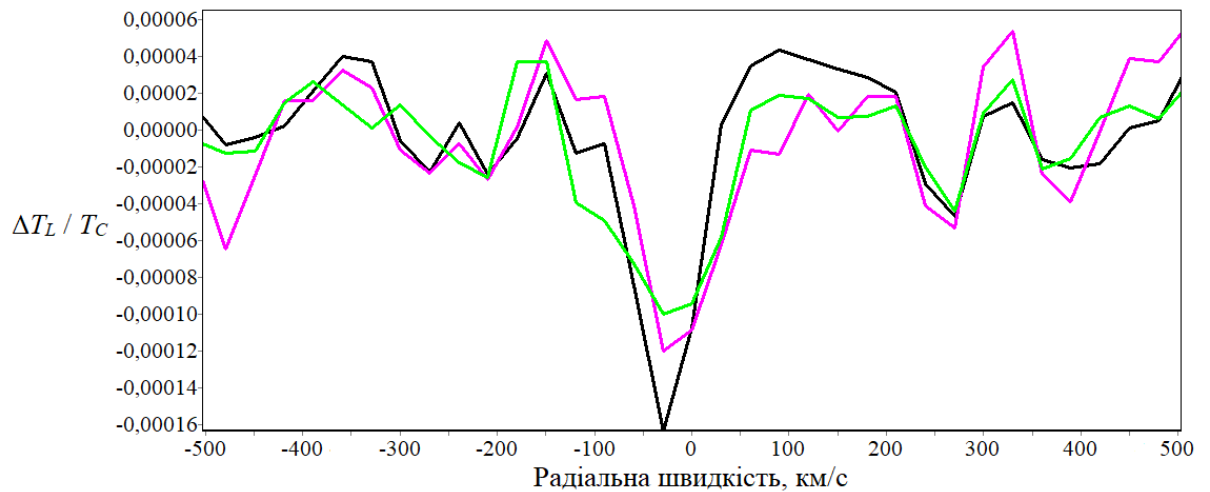


Рис. 5.11. Спостережувані відносні інтенсивності РРЛ вуглецю, зареєстрованих шляхом усереднення в частотній смузі 18 – 22 МГц. Кольорами на рисунку позначено: *чорний* – інтенсивність РРЛ у проміжку 4<sup>h</sup> – 5<sup>h</sup> (перетин галактичної площини,  $\bar{l} = 155^\circ$ ;  $\bar{b} = 0^\circ$ ), *фіолетовий* – інтенсивність РРЛ у проміжку 3<sup>h</sup> – 4<sup>h</sup> ( $\bar{l} = 147^\circ$ ;  $\bar{b} = -4^\circ$ ), *зелений* – інтенсивність РРЛ у проміжку 5<sup>h</sup> – 6<sup>h</sup> ( $\bar{l} = 160^\circ$ ;  $\bar{b} = 8^\circ$ ).

На рис. 5.12 – 5.15 наведено отримані підсумкові спектри, де вдалося зареєструвати низькочастотні РРЛ вуглецю шляхом усереднення 35 ліній в частотному діапазоні 23 – 27 МГц.

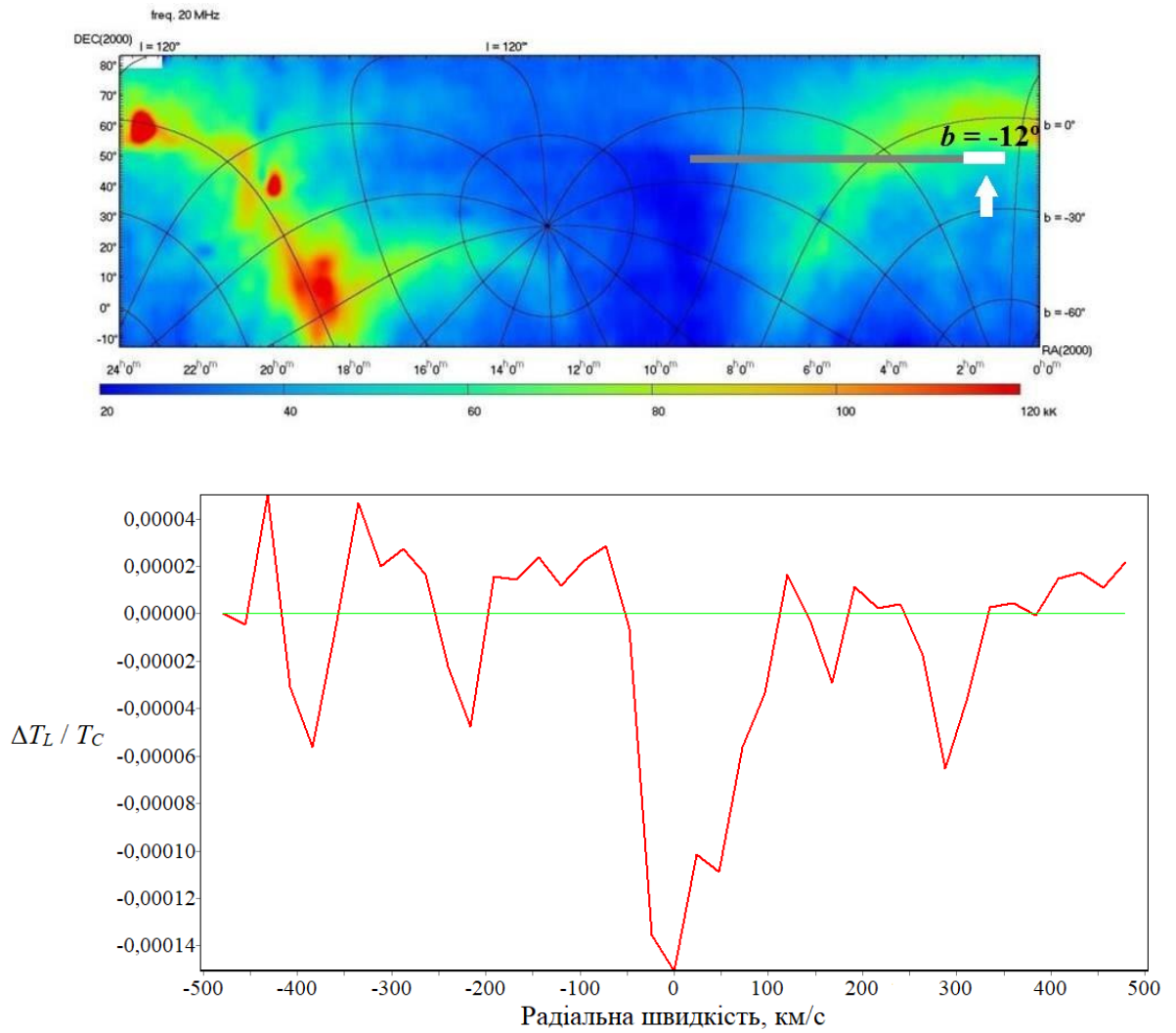


Рис. 5.12. Спектр усередненої серії РРЛ С624 – С658 $\alpha$  (35 ліній, діапазон 23 – 27 МГц) у ділянці простору 1<sup>h</sup> – 2<sup>h</sup> ( $\bar{l} = 129^\circ$ ;  $\bar{b} = -12^\circ$ ). Ефективний час накопичення складає 304 години, місцевий час проходження ділянки діаграмою антени близько 18:45 – 19:45.

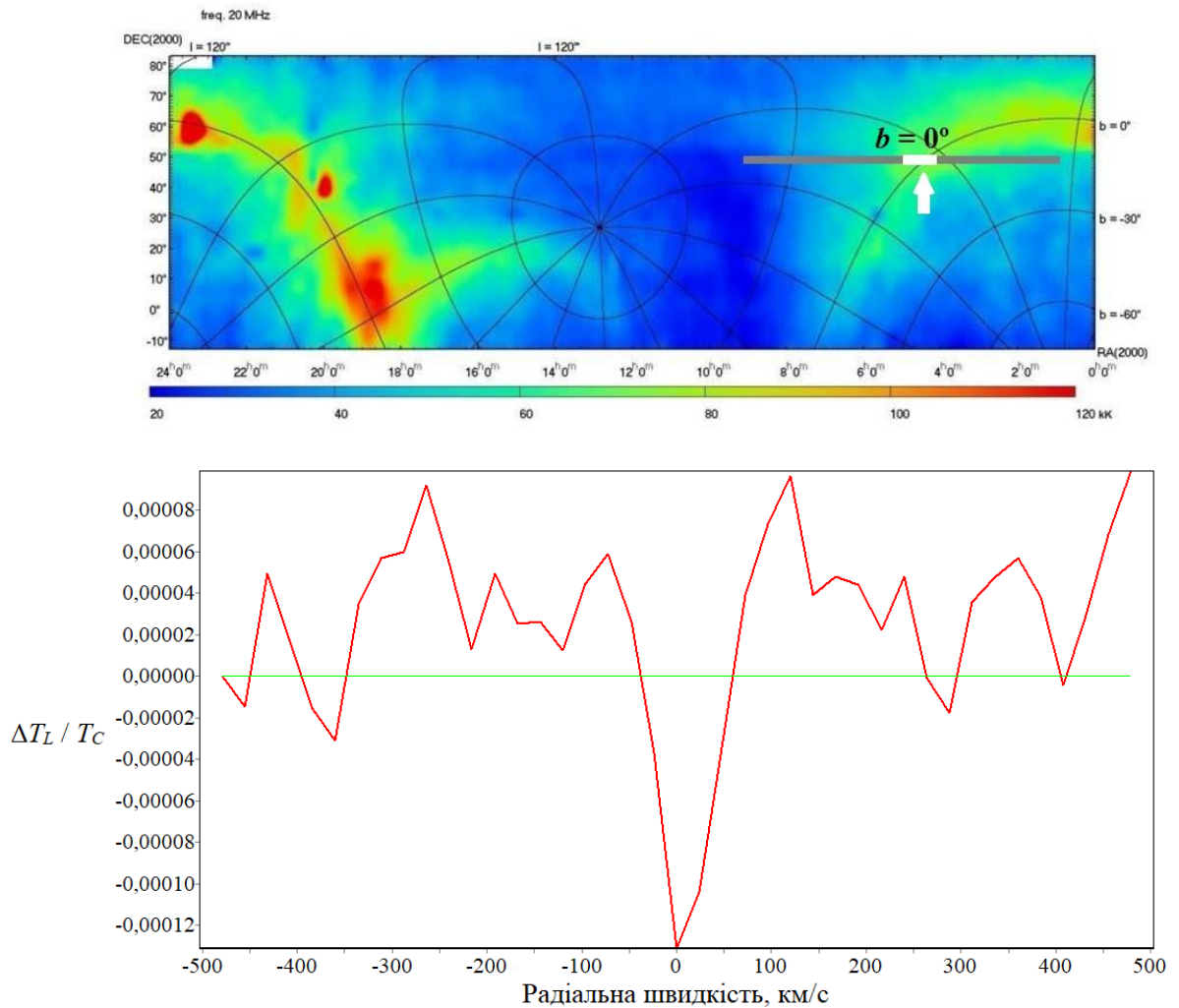


Рис. 5.13. Спектр усередненої серії РРЛ С624 – С658α (35 ліній, діапазон 23 – 27 МГц) у ділянці простору  $4^{\text{h}} - 5^{\text{h}}$  ( $\bar{l} = 155^{\circ}$ ;  $\bar{b} = 0^{\circ}$ ). Ефективний час накопичення складає приблизно 374 години, місцевий час проходження ділянки діаграмою антени близько 21:45 – 22:45.



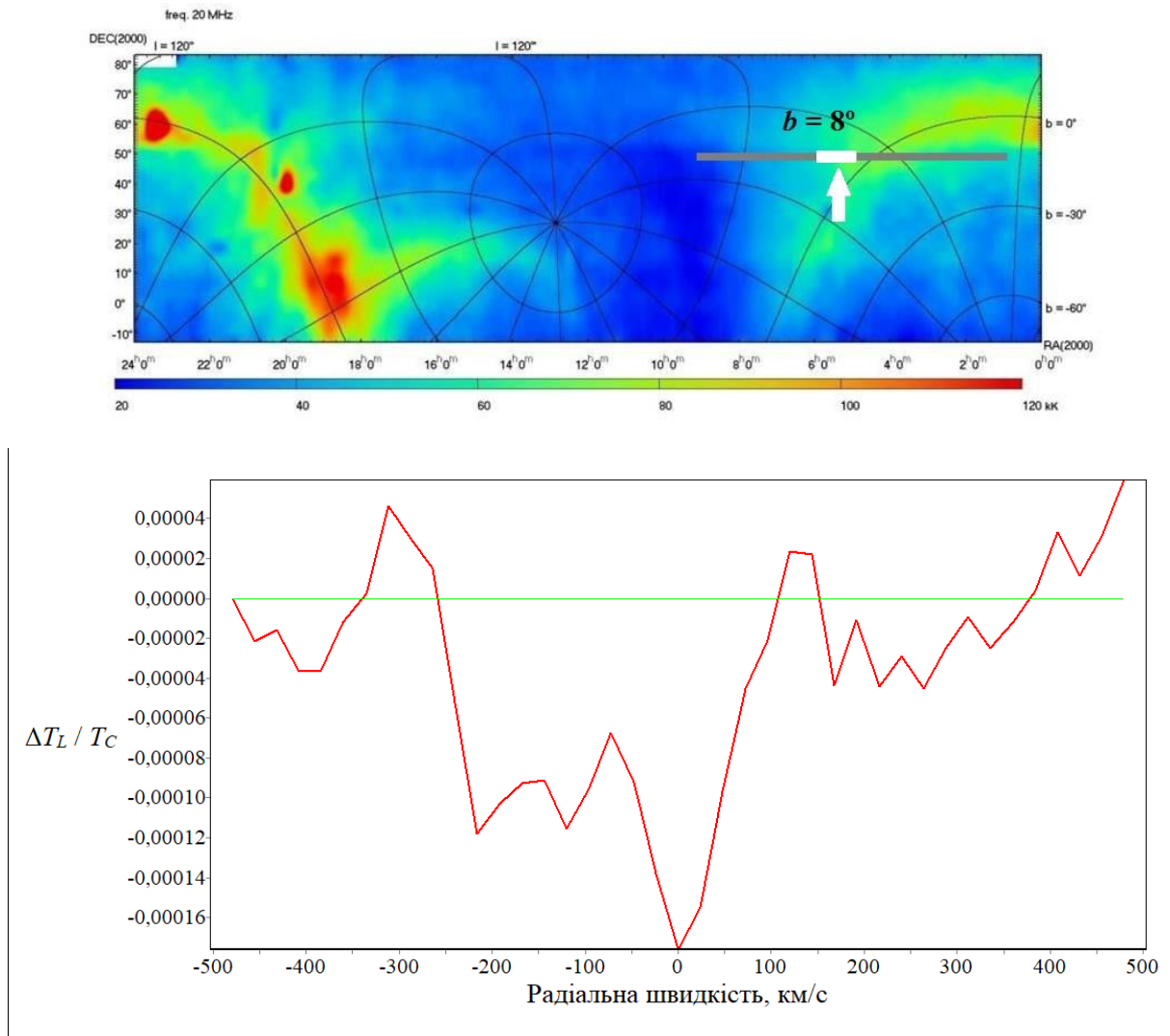


Рис. 5.14. Спектр усередненої серії РРЛ С624 – С658α (35 ліній, діапазон 23 – 27 МГц) у ділянці простору  $5^{\text{h}} - 6^{\text{h}}$  ( $\bar{l} = 160^{\circ}$ ;  $\bar{b} = 8^{\circ}$ ). Ефективний час накопичення складає приблизно 367 годин, місцевий час проходження ділянки діаграмою антени близько 22:45 – 23:45.

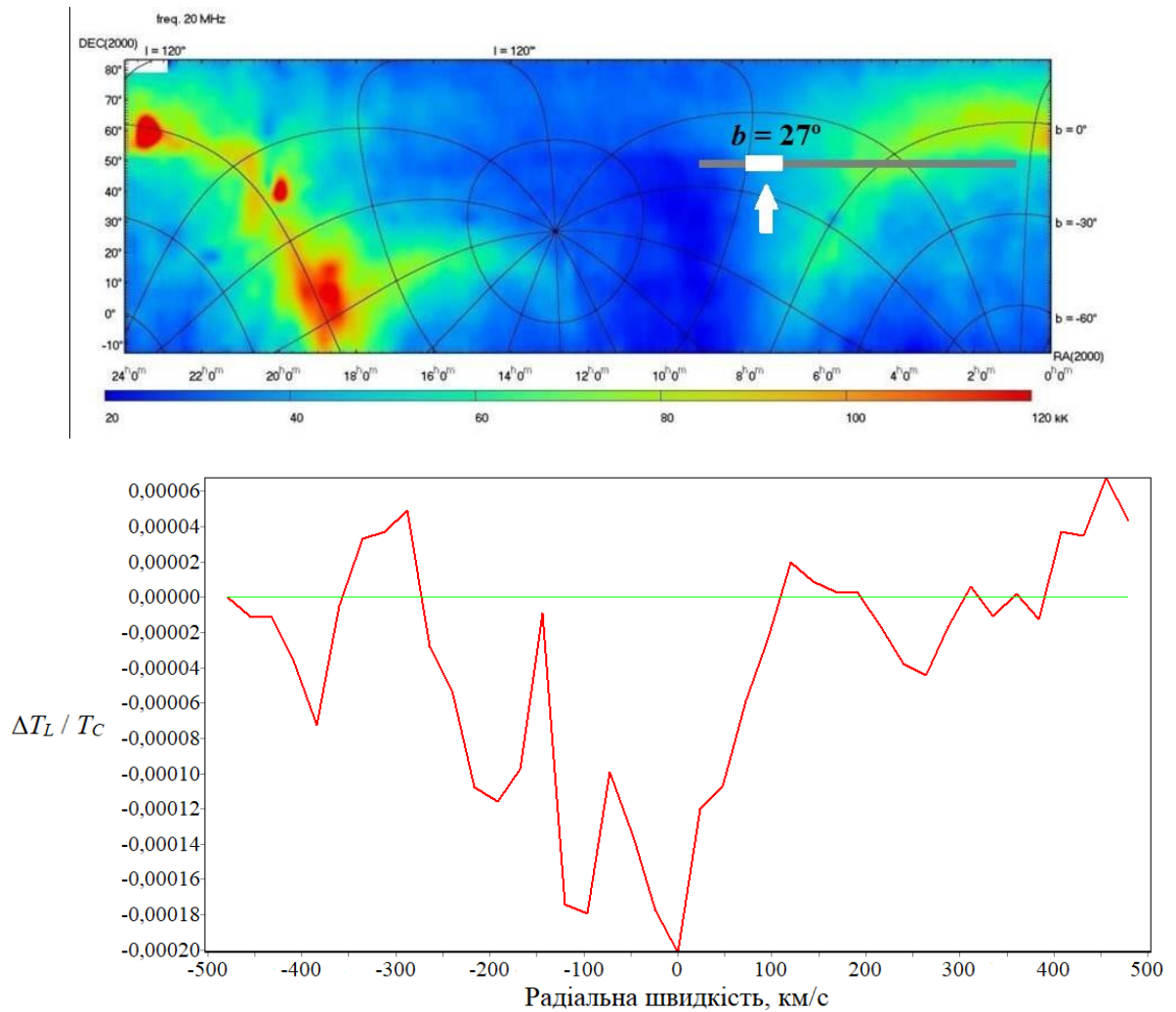


Рис. 5.15. Спектр усередненої серії РРЛ С624 – С658α (35 ліній, діапазон 23 – 27 МГц) у ділянці простору 7<sup>h</sup> – 8<sup>h</sup> ( $\bar{l} = 168^\circ$ ;  $\bar{b} = 27^\circ$ ). Ефективний час накопичення складає приблизно 388 годин, місцевий час проходження ділянки діаграмою антени близько 00:45 – 01:45.

Для цього частотного діапазону вдалося зареєструвати РРЛ вуглецю для ділянок, що відповідають  $-13^\circ < b < +31^\circ$ . Реєстрація ліній на таких великих широтах стала можливою завдяки більш сприятливим умовам під час спостережень у більш високочастотній частині діапазону частот УТР-2, де спостерігалося значно менше завад. Факт того, що інтенсивність ліній на високих галактичних широтах перевищує інтенсивності ліній в межах площини, свідчить про викаження базової лінії з-за більш низької чутливості вимірювань і невеликого часу накопичення для високоширотних напрямків (результати повинні

узгоджуватись із вимірюваннями в діапазоні 18 – 22 МГц, де максимум інтенсивності спостерігався в межах площини), внаслідок чого інтенсивність зареєстрованих ліній дещо завищена. Спостережні характеристики зареєстрованих усереднених в діапазоні 23 – 27 МГц ліній наведені в таблиці 5.2. На рис. 5.16 наведено порівняння інтенсивностей та ширин ліній, отриманих шляхом усереднення у цій частотній смузі.

Таблиця 5.2

Отримані спостережні характеристики усередненої серії РРЛ вуглецю  
С624 – С658а (23 – 27 МГц)

Проміжок відносно прямого піднесення	Довготний діапазон (середня довгота $\bar{l}$ )	Широтний діапазон (середня широта $\bar{b}$ )	Відносна інтенсивність $\frac{\Delta T_L}{T_C} (\times 10^{-4})$	Ширина лінії
1 <sup>h</sup> – 2 <sup>h</sup>	124°50'36",1 ÷ 134°42'36",1 (129°)	–13°17'26",6 ÷ –11°40'22",7 (–12°)	1.5	80 км/с (6.67 кГц)
2 <sup>h</sup> – 3 <sup>h</sup>	134°42'36",1 ÷ 143°49'52",9 (139°)	–11°40'22",7 ÷ –7°52'19",5 (–9°)	–	–
3 <sup>h</sup> – 4 <sup>h</sup>	143°49'52",9 ÷ 151°47'42",7 (147°)	–7°52'19",5 ÷ –2°12'29",3 (–4°)	–	–
4 <sup>h</sup> – 5 <sup>h</sup>	151°47'42",7 ÷ 158°23'33",1	–2°12'29",3 ÷ 4°56'52",8	1.3	51 км/с (4.25 кГц)

	(155°)	(0°)		
5 <sup>h</sup> – 6 <sup>h</sup>	158°23'33",1 ÷ 163°33'54",4 (160°)	4°56'52",8 ÷ 13°12' 36",8 (8°)	1.8	64 км/с (5.33 кГц)
6 <sup>h</sup> – 7 <sup>h</sup>	163°33'54",4 ÷ 167°14'40",08 (165°)	13°12'36",8 ÷ 22°14' 54",3 (18°)	–	–
7 <sup>h</sup> – 8 <sup>h</sup>	167°14'40",08 ÷ 169°17'41",9 (168°)	22°14'54",3 ÷ 31°44'56",7 (27°)	2.0	58 км/с (4.83 кГц)
8 <sup>h</sup> – 9 <sup>h</sup>	169°17'41",9 ÷ 169°16'5' (169°)	31°44'56",7 ÷ 41°24'25",5 (36°)	–	–

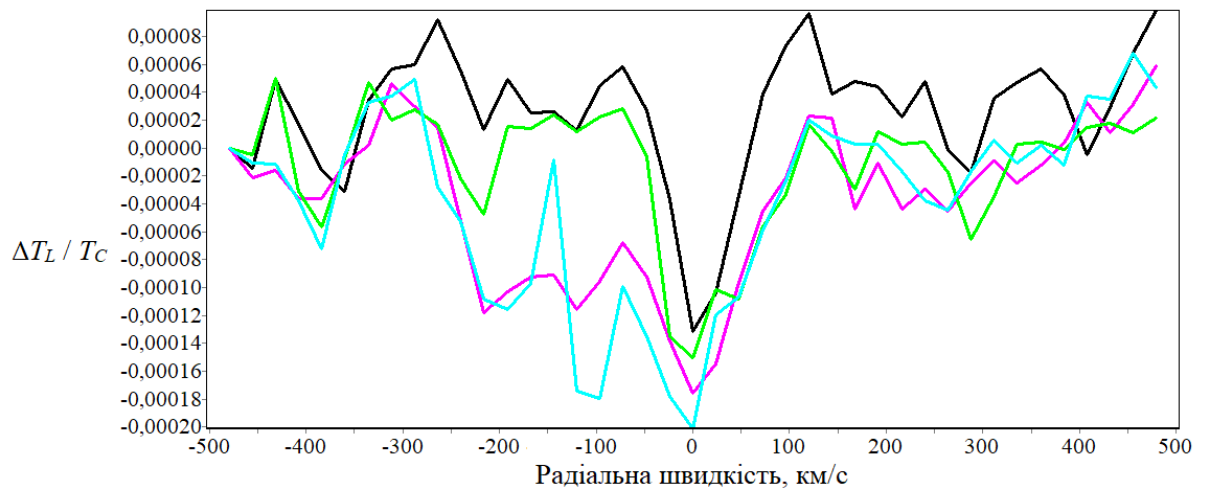


Рис. 5.16. Спостережувані відносні інтенсивності РРЛ вуглецю, зареєстрованих шляхом усереднення в частотній смузі 23 – 27 МГц. Кольорами на рисунку позначено: *чорний* – інтенсивність РРЛ у проміжку 4<sup>h</sup> – 5<sup>h</sup> (перетин галактичної

площини,  $\bar{l} = 155^\circ$ ;  $\bar{b} = 0^\circ$ ), *фіолетовий* – інтенсивність РРЛ у проміжку  $5^h - 6^h$  ( $\bar{l} = 160^\circ$ ;  $\bar{b} = 8^\circ$ ), *зелений* – інтенсивність РРЛ у проміжку  $1^h - 2^h$  ( $\bar{l} = 129^\circ$ ;  $\bar{b} = -12^\circ$ ), *бірюзовий* – інтенсивність РРЛ у проміжку  $7^h - 8^h$  ( $\bar{l} = 168^\circ$ ;  $\bar{b} = 27^\circ$ ).

Варто зауважити, що під час усереднення великої кількості ліній ефективно декорелюються завади в каналах, близьких до РРЛ. При спектроскопічних спостереженнях на УТР-2 вперше була реалізована така вкрай висока чутливість вимірювань шляхом одночасного усереднення більше сорока РРЛ. Отримані результати підтверджують правильність обраних методик проведення спостережень та обробки даних.

Слід, однак, зазначити, що залишається певна неоднозначність з процедурою видалення базової лінії. Варто відмітити, що різниця по потужності сигналу в спектрах в певних каналах складає більше 20 дБ (смуга аналізу DSP-Z розбита на три підсмуги з різним рівнем підсилення). Без врахування цього при побудуванні моделі це може негативним боком відбитися на якості отримуваних спектрів. Розробляються шляхи усунення такого негативного впливу, як варіант – видалення із спектру постійної складової (із підсумкового спектру віднімається аналогічний спектр, отриманий за допомогою генератора шуму).

### **5.3. Вивчення довготного та широтного розподілу характеристик РРЛ вуглецю та лінії нейтрального гідрогену Н І**

У рамках дослідження просторового зв'язку областей С II у площині Галактики та за її межами, було проведено порівняльний аналіз зареєстрованих у близзенітній ділянці спектрів низькочастотних РРЛ вуглецю із спектрами лінії нейтрального гідрогену Н І у тих самих спостережуваних проміжках. Для цього дані, отримані у ході виконання огляду LAB [103] були усереднені нами для кутових розмірів, відповідних більшій протяжності ДН антени «Північ – Південь» УТР-2 (синтезована ДН для Н І становить  $\alpha \times \delta = 12^\circ \times 12^\circ$ ). На рис. 5.17 – 5.21

наведені підсумкові спектри РРЛ для проміжків від 1<sup>h</sup> до 9<sup>h</sup>, що були зіставлені із спектрами лінії Н І. Дані про характеристики лінії Н І наведено в таблиці 5.3.

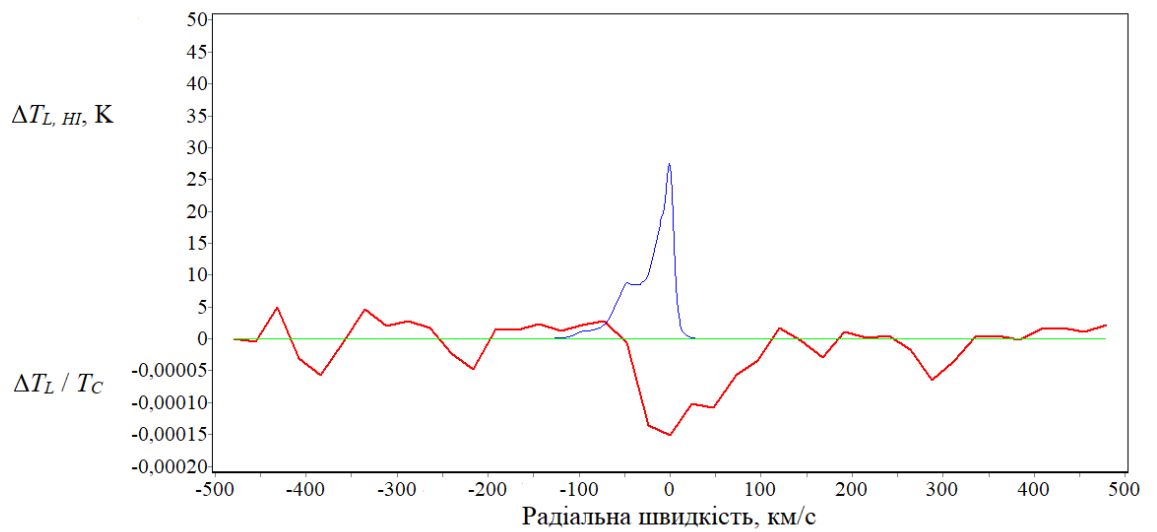


Рис. 5.17. Червона лінія – Спектр усередненої серії РРЛ С624 – С658а (23 – 27 МГц), що відповідає ділянці середовища 1<sup>h</sup> – 2<sup>h</sup> відносно прямого піднесення ( $\bar{l} = 129^\circ$ ;  $\bar{b} = -12^\circ$ ). Ефективний час накопичення складає приблизно 304 години, місцевий час проходження ділянки діаграмою антени близько 18:45 – 19:45. Синя лінія – Спектр лінії нейтрального гідрогену Н І, просторово усереднений у ділянці середовища 1<sup>h</sup> – 2<sup>h</sup> ( $\bar{l} = 129^\circ$ ;  $\bar{b} = -12^\circ$ ) із синтезованим розміром ДН  $12^\circ \times 12^\circ$ .

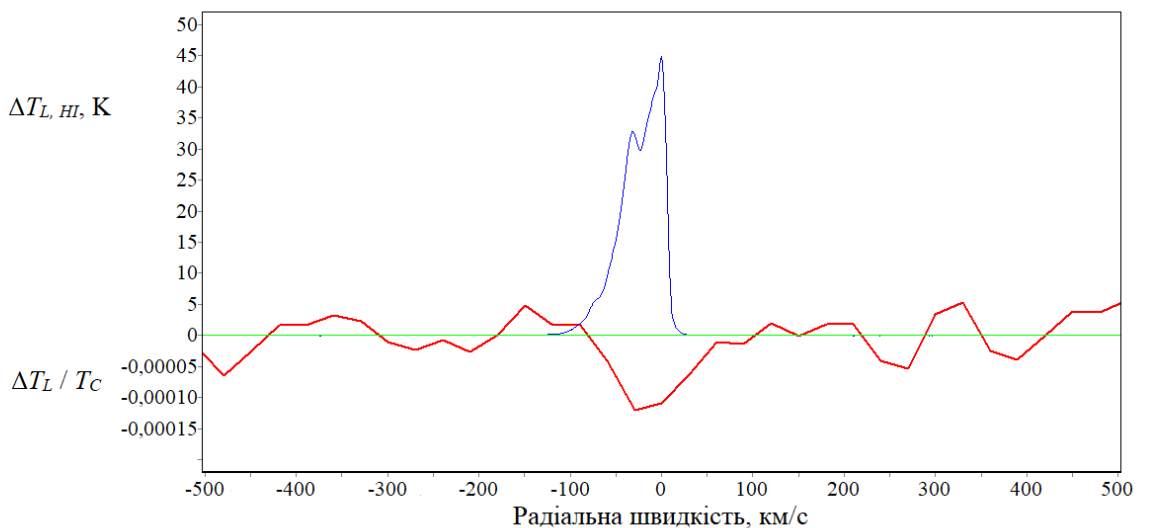


Рис. 5.18. Червона лінія – Спектр усередненої серії РРЛ С668а – С714а (18 – 22 МГц), що відповідає ділянці середовища 3<sup>h</sup> – 4<sup>h</sup> відносно прямого піднесення ( $\bar{l} = 147^\circ$ ;  $\bar{b} = -4^\circ$ ). Ефективний час накопичення складає приблизно 385 годин,

місцевий час проходження ділянки діаграмою антени близько 20:45 – 21:45. *Синя лінія* – Спектр лінії нейтрального гідрогену Н І, просторово усереднений у ділянці середовища 3<sup>h</sup> – 4<sup>h</sup> ( $\bar{l} = 147^\circ$ ;  $\bar{b} = -4^\circ$ ) із синтезованим розміром діаграми направленості  $12^\circ \times 12^\circ$ .

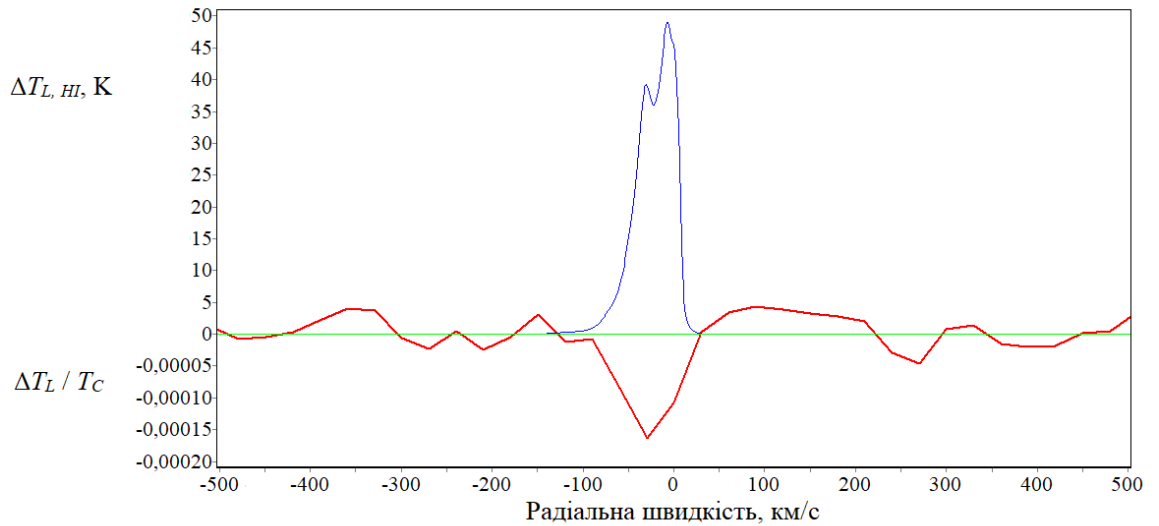


Рис. 5.19. *Червона лінія* – Спектр усередненої серії РРЛ С668α – С714α (18 – 22 МГц), що відповідає ділянці середовища 4<sup>h</sup> – 5<sup>h</sup> відносно прямого піднесення (перетин галактичної площини,  $\bar{l} = 155^\circ$ ;  $\bar{b} = 0^\circ$ ). Ефективний час накопичення складає приблизно 503 годин, місцевий час проходження ділянки діаграмою антени близько 21:45 – 22:45. *Синя лінія* – Спектр лінії нейтрального гідрогену Н І, просторово усереднений у ділянці середовища 4<sup>h</sup> – 5<sup>h</sup> (перетин галактичної площини,  $\bar{l} = 155^\circ$ ;  $\bar{b} = 0^\circ$ ) із синтезованим розміром діаграми направленості  $12^\circ \times 12^\circ$ .

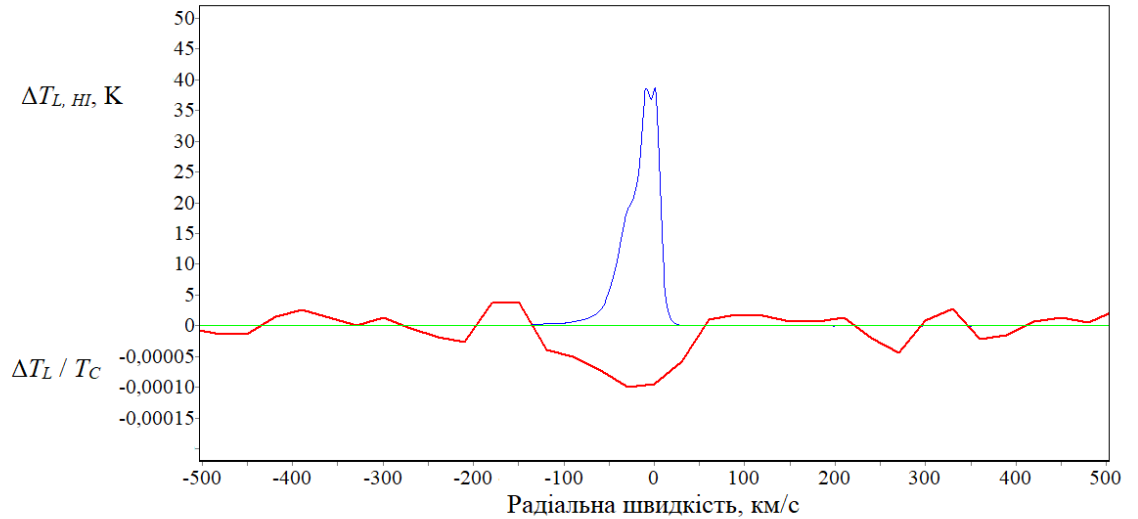


Рис. 5.20. Червона лінія – Спектр усередненої серії РРЛ С668α – С714α (18 – 22 МГц), що відповідає ділянці середовища 5<sup>h</sup> – 6<sup>h</sup> відносно прямого піднесення ( $\bar{l} = 160^\circ$ ;  $\bar{b} = 8^\circ$ ). Ефективний час накопичення складає приблизно 493 години, місцевий час проходження ділянки діаграмою антени близько 22:45 – 23:45. Синя лінія – Спектр лінії нейтрального гідрогену Н I, просторово усереднений у ділянці середовища 5<sup>h</sup> – 6<sup>h</sup> ( $\bar{l} = 160^\circ$ ;  $\bar{b} = 8^\circ$ ) із синтезованим розміром діаграми направленості  $12^\circ \times 12^\circ$ .

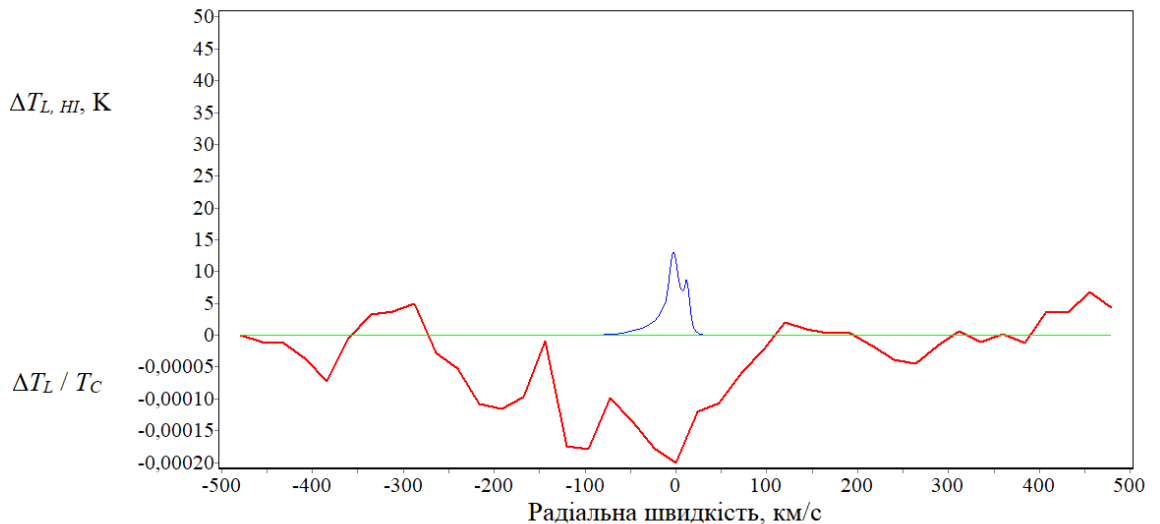


Рис. 5.21. Червона лінія – Спектр усередненої серії РРЛ С624 – С658α (23 – 27 МГц), що відповідає ділянці середовища 7<sup>h</sup> – 8<sup>h</sup> відносно прямого піднесення ( $\bar{l} = 168^\circ$ ;  $\bar{b} = 27^\circ$ ). Ефективний час накопичення складає приблизно 388 годин, місцевий час проходження ділянки діаграмою антени близько 00:45 – 01:45. Синя



лінія – Спектр лінії нейтрального гідрогену H I, просторово усереднений у ділянці середовища 7<sup>h</sup> – 8<sup>h</sup> ( $\bar{l} = 168^\circ$ ;  $\bar{b} = 27^\circ$ ) із синтезованим розміром діаграми направленості  $12^\circ \times 12^\circ$ .

Таблиця 5.3

Характеристики лінії H I, зареєстрованих в огляді LAB після усереднення в межах ДН антени «Північ – Південь» УТР-2 ( $\alpha \times \delta = 12^\circ \times 12^\circ$ )

Проміжок відносно прямого піднесення	Довготний діапазон (середня довгота $\bar{l}$ )	Широтний діапазон (середня широта $\bar{b}$ )	Яскравісна температура	Ширина лінії
1 <sup>h</sup> – 2 <sup>h</sup>	124°50'36",1 ÷ 134°42'36",1 (129°)	-13°17'26",6 ÷ -11°40'22",7 (-12°)	27.53 К	58 км/с (274.75 кГц)
2 <sup>h</sup> – 3 <sup>h</sup>	134°42'36",1 ÷ 143°49'52",9 (139°)	-11°40'22",7 ÷ -7°52'19",5 (-9°)	35.68 К	48 км/с (227.38 кГц)
3 <sup>h</sup> – 4 <sup>h</sup>	143°49'52",9 ÷ 151°47'42",7 (147°)	-7°52'19",5 ÷ -2°12'29",3 (-4°)	44.89 К	50 км/с (236.85 кГц)
4 <sup>h</sup> – 5 <sup>h</sup>	151°47'42",7 ÷ 158°23'33",1 (155°)	-2°12'29",3 ÷ 4°56'52",8 (0°)	49.01 К	49 км/с (232.12 кГц)
5 <sup>h</sup> – 6 <sup>h</sup>	158°23'33",1 ÷ 163°33'54",4	4°56'52",8 ÷ 13°12'36",8	38.6 К	34.8 км/с (164.85 кГц)

	(160°)	(8°)		
6 <sup>h</sup> – 7 <sup>h</sup>	163°33'54",4 ÷ 167°14'40",08 (165°)	13°12'36",8 ÷ 22°14' 54",3 (18°)	21.6 К	28 км/с  (132.63 кГц)
7 <sup>h</sup> – 8 <sup>h</sup>	167°14'40",08 ÷ 169°17'41",9 (168°)	22°14'54",3 ÷ 31°44'56",7 (27°)	13.05 К	23 км/с  (108.95 кГц)
8 <sup>h</sup> – 9 <sup>h</sup>	169°17'41",9 ÷ 169°16'5' (169°)	31°44'56",7 ÷ 41°24'25",5 (36°)	8.12 К	21 км/с  (99.47 кГц)

Нейтральний гідроген Н I широко розповсюджений у Галактиці із максимумом інтенсивності в галактичній площині. Як можна бачити із порівняння спектрів, низькочастотні РРЛ вуглецю і лінія нейтрального гідрогену Н I добре просторово узгоджуються в термінах радіальної швидкості. Для яскравіших температур лінії Н I можна побачити таку ж саму поведінку, що й у зареєстрованих нами РРЛ вуглецю в діапазоні 18 – 22 МГц – максимум в межах галактичної площини та поступове зменшення при відхиленнях від площини (у межах площини лінія Н I у 6 разів інтенсивніша, ніж при  $b > +30^\circ$ ). Це легко пояснюється присутністю великих об'ємів нейтрального гідрогену в галактичній площині та його експоненційне зниження при збільшенні висоти над площиною. На рис. 5.22 наведено порівняння характеристик ліній у різних проміжках вздовж прямого піднесення.

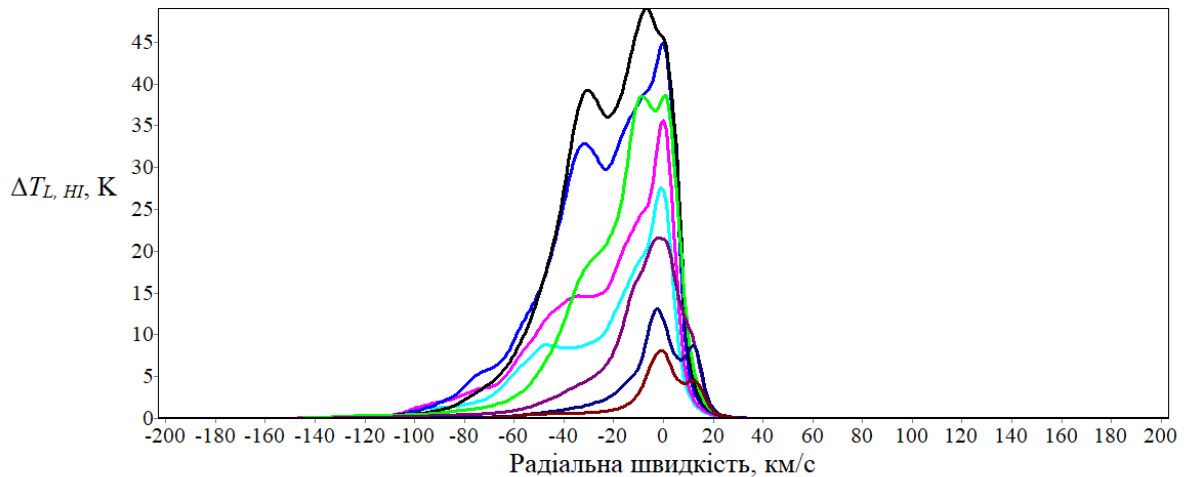


Рис. 5.22. Спектри лінії Н I з огляду LAB, синтезовані до просторової роздільної здатності  $12^\circ \times 12^\circ$  для проміжків відносно прямого піднесення. Кольори ліній відповідають галактичним широтам: *бірюзовий* –  $1^h - 2^h$  ( $\bar{l} = 129^\circ$ ;  $\bar{b} = -12^\circ$ ), *фіолетовий* –  $2^h - 3^h$  ( $\bar{l} = 139^\circ$ ;  $\bar{b} = -9^\circ$ ), *синій* –  $3^h - 4^h$  ( $\bar{l} = 147^\circ$ ;  $\bar{b} = -4^\circ$ ), *чорний* –  $4^h - 5^h$  (перетин галактичної площини,  $\bar{l} = 155^\circ$ ;  $\bar{b} = 0^\circ$ ), *зелений* –  $5^h - 6^h$  ( $\bar{l} = 160^\circ$ ;  $\bar{b} = 8^\circ$ ), *пурпурний* –  $6^h - 7^h$  ( $\bar{l} = 165^\circ$ ;  $\bar{b} = 18^\circ$ ), *темно-синій* –  $7^h - 8^h$  ( $\bar{l} = 168^\circ$ ;  $\bar{b} = 27^\circ$ ), *темно-червоний* –  $8^h - 9^h$  ( $\bar{l} = 169^\circ$ ;  $\bar{b} = 36^\circ$ ).

Ширина лінії Н I усередненої нами до просторової роздільної здатності  $\alpha \times \delta = 12^\circ \times 12^\circ$  показала цікаві особливості – більші ширини при негативних галактичних довготах і менші ширини на позитивних галактичних широтах. Для пояснення цього факту варто дослідити розподіл газу Н I на різних широтах в межах однієї фіксованої галактичної довготи. Річ у тому, що при спостереженнях на УТР-2 із фіксованою ДН за рахунок обертання Землі, діаграма при скануванні у напрямку більш високих широт не залишається в межах однієї довготи, тому може реєструватися газ, що лежить на різних довготах і, відповідно, при різних радіальних швидкостях.

Результати порівняння широтного розподілу характеристик Н I на окремих довготах відрізняються від характеристик синтезованих ліній у проміжках, де спостерігались РРЛ – найбільша ширина лінії Н I у межах площини, за її межами значно менша (у 3 – 5 разів). Але для всіх «середніх» довгот окрім  $l = 129^\circ$  можна

побачити незначне збільшення ширини у проміжку  $-30^\circ < b < -45^\circ$ . На довготах  $147^\circ$ ,  $155^\circ$  і  $160^\circ$  у проміжку  $+30^\circ < b < +45^\circ$  ширина лінії також незначно збільшується.

Таким чином, можна зробити висновок, що характеристики зареєстрованих низькочастотних РРЛ вуглецю мають дуже добру кореляцію з характеристиками лінії Н І, принаймні, для проміжку  $-7^\circ < b < +13^\circ$ . Обидва типи ліній мають гарне узгодження по радіальним швидкостям. Інтенсивності обох типів ліній максимальні у межах галактичної площини і зменшуються при відхиленнях від площини у бік високих галактичних широт. Дуже цікавим виявилось співпадіння такої особливості ліній, як збільшення їх ширини за межами площини Галактики (дуже чітка кореляція для ділянки  $1^h - 2^h$ ).

#### 5.4. Астрофізичний аналіз отриманих даних

Реєстрація низькочастотних РРЛ вуглецю на високих галактичних широтах підтверджує факт наявності великих об'ємів іонізованого вуглецю далеко за межами галактичної площини у CNM, що становить важливий астрофізичний результат. Знання великомасштабного розподілу іонізованого газу в Галактиці має велике значення при дослідженнях еволюційних та енергетичних характеристик у МЗС.

Для спостережуваних проміжків у межах галактичної площини ширини зареєстрованих РРЛ вуглецю становлять  $51 - 59$  км/с ( $3.93 - 4.25$  кГц), що є очікуваним маючи на увазі великий розмір ДН антени «Північ – Південь» радіотелескопа УТР-2 вздовж прямого піднесення. Якщо порівняти результати усереднених серій ліній в частотних смугах  $18 - 22$  та  $23 - 27$  МГц, можна побачити, що із зменшенням частоти ширина лінії не збільшується. При попередніх дослідженнях для напрямків у межах площини Галактики реєструвалися низькочастотні РРЛ вуглецю з ширинами від  $18$  до  $55$  км/с ( $34.5$  МГц, [59]), від  $5$  до  $47$  км/с ( $76$  МГц, [58]), від  $4$  до  $47$  км/с ( $327$  МГц, [60]). Виходячи з того, що при багаточастотному аналізі (від  $20$  до  $327$  МГц) із

зменшенням частоти ширина ліній у межах галактичної площини не збільшується – можна виключити вплив на ширину ліній механізмів розширення тиском і випромінюванням, які є суворими функціями головного квантового числа  $n$ . Відповідно, основним механізмом розширення ліній у холодному газі на тлі фонового нетеплового галактичного радіовипромінювання у межах площини є Доплерівське розширення. Ширина зареєстрованих РРЛ може бути обумовлена внеском різних компонентів газу при різних радіальних швидкостях.

При відхиленнях від галактичної площини було зареєстровано суттєве збільшення ширини низькочастотних РРЛ вуглецю. Це може бути обумовленим як потраплянням до широкої ДН великих об'ємів газу з широким діапазоном радіальних швидкостей внаслідок внутрішніх турбулентних рухів, так і тим фактом, що при скануванні небесної сфери нерухомою ДН радіотелескопа змінюється не тільки координата галактичної широти, але й галактичної довготи. Слід зауважити, що на різних висотах  $z$  над площиною Галактики швидкість диференційного обертання речовини відрізняється, це також може розширювати діапазон радіальних швидкостей газу, що потрапляє в ДН. Аналогічне збільшення ширини спостерігається і при синтезуванні даних лінії Н І, взятих з огляду LAB [96] до розмірів діаграми антени «Північ – Південь» радіотелескопа УТР-2. Доведено, що ширина ліній Н І на високих широтах уздовж фіксованої галактичної довготи значно менша, ніж у межах площини. Виходячи з просторового узгодження даних низькочастотних РРЛ і лінії Н І, можна очікувати, що ширина РРЛ також буде зменшуватись при великих широтах у межах фіксованої довготи. Також на користь цього свідчать різноширотні спектри для окіл S140 у підрозділі 3.3. Відповідні вимірювання на фіксованій довготі після повного покриття оглядом у низькочастотних РРЛ цілком можна реалізувати.

Інтенсивності обох типів ліній мають максимум при перетині галактичної площини та поступово зменшуються при відхиленні від площини. Це чітко видно на рис. 5.11 для смуги усереднення 18 – 22 МГц. Для смуги усереднення 23 – 27 МГц при  $b > +20^\circ$  інтенсивність РРЛ перевищує аналогічне значення в площині. Завтражене значення інтенсивності може бути обумовлене дещо

недостатньою чутливістю вимірювань, що призвело до неточного видалення базової лінії.

Варто зауважити, що спостережувані нами відносні інтенсивності РРЛ вуглецю не дорівнюють реальним. При виконанні великомасштабних досліджень широкою ДН немає можливості оцінити більш-менш точні розміри областей формування ліній, основними цілями є сам факт наявності іонізованого газу на промені зору або його відсутності. Для оцінки розмірів областей С II допоможе реалізація найвищої кутової роздільної здатності радіотелескопа УТР-2 в обраних ділянках (насамперед, цікаві проміжки  $1^{\text{h}} - 2^{\text{h}}$  ( $\bar{l} = 129^\circ$ ;  $\bar{b} = -12^\circ$ ) та  $7^{\text{h}} - 8^{\text{h}}$  ( $\bar{l} = 168^\circ$ ;  $\bar{b} = 27^\circ$ ), де були зареєстровані РРЛ на найбільших віддаленнях від галактичної площини), після чого можливий прецизійний аналіз фізичних умов у газі.

Вище неодноразово було сказано, що частотна роздільна здатність при оглядових спостереженнях, які описуються у даній роботі, недостатня для детального аналізу профілів ліній. Недостатня роздільна здатність по частоті може завищувати спостережувані ширини ліній та недооцінювати інтенсивності. Аналіз фізичних умов при цьому вкрай ускладнений. На рис. 5.23 наведено приклад спектрів низькочастотних РРЛ вуглецю, отриманих для напрямків  $l = 10^\circ$ ,  $50^\circ$ ,  $80^\circ$  при  $b = 0^\circ$  на радіотелескопі УТР-2 за допомогою ЦК з частотною роздільною здатністю нижче 1 кГц. Чітко можна побачити різницю із спектрами, отриманими у даній роботі при частотній роздільній здатності 4 кГц. Забезпечення високої частотної роздільної здатності вкрай необхідне для забезпечення високочутливої радіоспектроскопії при майбутніх дослідженнях.

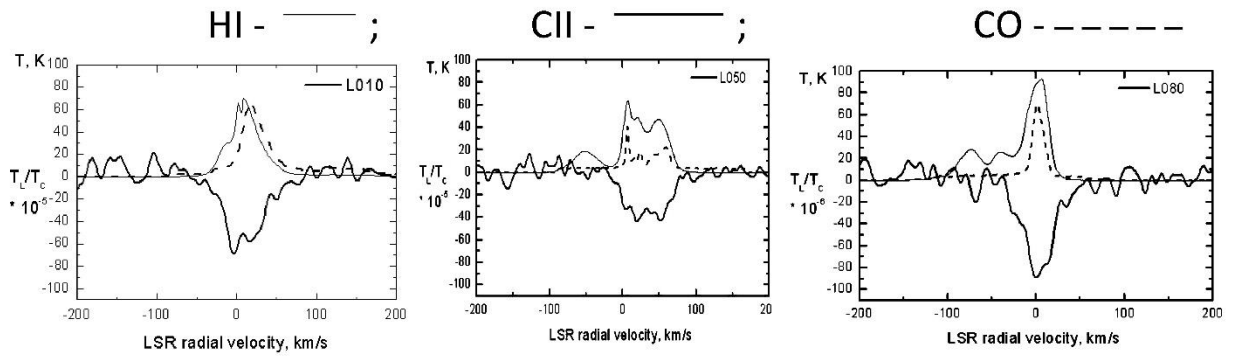


Рис. 5.23. Усереднені спектри низькочастотних РРЛ вуглецю – товста лінія: *ліворуч* – серія С683 $\alpha$  – С697 $\alpha$  (частота 20 МГц),  $l = 10^\circ$ ,  $b = 0^\circ$ ; *всередині* – серія С635 $\alpha$  – С645 $\alpha$  (частота 25 МГц),  $l = 50^\circ$ ,  $b = 0^\circ$ ; *праворуч* – серія С635 $\alpha$  – С645 $\alpha$  (частота 25 МГц),  $l = 80^\circ$ ,  $b = 0^\circ$ . Тонкою лінією позначені синтезовані спектри лінії Н I, штриховою лінією – спектри лінії СО в тих самих напрямках. Рисунок узятий з роботи [32].

Але недостатня частотна роздільна здатність не впливає на спостережувану інтегральну інтенсивність ліній, яка безпосередньо пов'язана із параметрами фізичних умов в С II областях. По аналогії з аналізом даних, наведеним у підрозділі 3.4, можна оцінити діапазони електронних температур та електронних густин за спостережуваною інтегральною інтенсивністю ліній. Інтегральні інтенсивності зареєстрованих РРЛ вуглецю як у межах галактичної площини, так і на високих галактичних широтах, становлять  $-0.45 \div -0.7 \text{ с}^{-1}$ . Якщо провести розрахунки за формулою (3.1) для наборів значень  $T_e$ ,  $N_e$ ,  $s$  та  $b_n \beta_n$ , зазначених у таблицях 3.3 і 3.4, спостережуваним інтегральним інтенсивностям РРЛ вуглецю, зареєстрованих при огляді на різних галактичних широтах, відповідають  $T_e = 50 - 100$ ,  $N_e \leq 0.01 \text{ см}^{-3}$ ,  $n_H \leq 35 \text{ см}^{-3}$ ,  $s = 5 - 10$  пк. Це типові значення для газу Н I у фазі CNM, де гідроген майже повністю весь нейтральний, а вуглець може бути частково або повністю іонізованим УФ-випромінюванням, космічними променями або рентгенівськими променями [80]. Питання про джерело іонізації вуглецю, зокрема на високих галактичних широтах, вдаліні від основних виробників УФ-випромінювання, вкрай нагальне.

Факт асоціації областей С II з хмарами Н I у МЗС дозволяє впроваджувати прецизійний метод визначення параметрів середовища в областях формування обох типів ліній [32]. Наведемо рівняння, що пов'язує спостережну інтенсивність лінії Н I з фізичними параметрами хмар Н I:

$$N_H \approx n_H s \approx 3.88 \cdot 10^{17} T_K \int \tau_H(\nu) d\nu, \quad (5.1)$$

де  $n_H$  – об'ємна концентрація гідрогену,  $s$  – розмір хмари крізь промінь зору,  $T_K$  – її кінетична температура. Цьому рівнянню відповідає вкрай широкий діапазон параметрів:  $T = 10 - 1000$  К,  $s = 0.1 - 100$  пк,  $n_H = 1 - 1000$  см<sup>-3</sup>.

При реєстрації у тій самій області РРЛ вуглецю, їх інтегральна інтенсивність буде визначатися за формулою

$$I_L = \int_{\nu} \frac{\Delta T_L}{T_C} d\nu \approx -2 \cdot 10^6 \frac{N_e^2 s}{T_e^{5/2}} b_n \beta_n, \quad (5.2)$$

а ширина – рівнянням

$$\Delta\nu \sim N_e n^{5.2} / T^{0.1}. \quad (5.3)$$

Таким чином, окрім одного рівняння (5.1) для лінії Н I з трьома невідомими параметрами (температура, густина та розмір хмари), яке передбачає широкий діапазон параметрів, маємо ще два рівня (5.2) і (5.3) для інтенсивності та ширини РРЛ вуглецю, за допомогою яких діапазон параметрів фізичних умов можна встановити більш чітко, як було вказано вище.

У роботі [136] було встановлено, що розподіл дифузного випромінювання лінії [С II] 158 мк не співпадає з розподілом нейтрального гідрогену на високих галактичних широтах. Було встановлено, що основним джерелом лінії тонкої структури іонів вуглецю там є WIM, котра може слугувати високотемпературною ( $T \sim 8000$  К), низькощільною короною дифузних холодних хмар CNM ( $T \sim 100$  К). Таким чином, іонізований вуглець присутній в Галактиці, принаймні, до висот  $z = 500$  пк, але спостереження в низькочастотних РРЛ вуглецю і в лінії [С II] 158 мк асоційовані з різними фазами МЗС.



## 5.5. Висновки по розділу 5

Даний розділ присвячений великомасштабним оглядовим спостереженням низькочастотних РРЛ вуглецю в Галактиці. Оглядові спостереження, виконані з високою чутливістю, можуть дати відповіді на питання щодо розподілу іонізованого газу, що є важливим при вивченні еволюційних, енергетичних та кінематичних особливостей холодної, частково-іонізованої плазми у МЗС. Була запропонована методологія оглядових радіоспектроскопічних спостережень на радіотелескопі УТР-2 шляхом сканування небесної сфери нерухомою ДН, орієнтованою в зенітне положення. Висока ефективність цієї методології разом з використанням широкосмугових, багатобітових цифрових спектроаналізаторів DSP-Z дозволяє одночасно із спектроскопією проводити дослідження континуального, імпульсного, спорадичного, поляризаційного радіовипромінювання для одного й того самого набору даних («10 в 1»). Ефективність цієї методології, зокрема, була показана на прикладі отримання спектрів повної потужності випромінювання, що була отримана протягом доби кожною з антен радіотелескопа УТР-2. Була проведена спектроскопічна обробка даних для близзенітної ділянки, спостереження якої були виконані 13 – 25 грудня 2015 року. Вперше низькочастотні РРЛ вуглецю спостерігались на великих відстанях від галактичної площини ( $-13^\circ < b < +31^\circ$ ). Розподіл іонізованого газу, що зареєстрований за допомогою низькочастотних РРЛ вуглецю як поблизу галактичної площини, так і при відхиленнях від неї, співпадає з розподілом атомарного газу в лінії нейтрального гідрогену H I. Це підтверджує теорію про зв'язок областей формування обох типів ліній та може слугувати фундаментом для подальших теоретичних та експериментальних досліджень фізики МЗС.

Основні положення розділу викладені в публікації автора [160].

## 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 Н I з урахуванням різної кутової роздільної здатності відповідних радіотелескопів на частотах 20 – 30 та 1420 МГц. Для узгодження кутових роздільних здатностей дані з розподілу Н I були усереднені до розміру  $12^\circ \times 12^\circ$ .
4. Вперше показано, що реєстрація РРЛ вуглецю та висока кореляція їх параметрів із лініями Н I 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  $0.01 \text{ см}^{-3}$ , об'ємна густина гідрогену менше  $35 \text{ см}^{-3}$ , 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).

## ПОДЯКИ

Автор вдячний своєму науковому керівникові академіку НАН України О. О. Коноваленку за допомогу в постановці задач, обговоренні й аналізі результатів, а також за всебічну підтримку протягом усього періоду виконання дисертаційної роботи. Автор висловлює вдячність С. В. Степкіну за багаторічну підтримку, передачу досвіду в опануванні методів спостережень на радіотелескопі УТР-2 за допомогою цифрового корелометру, корисні поради та зауваження при написанні програмного забезпечення для обробки радіоспектроскопічних даних. Також автор вдячний колективу Відділення низькочастотної радіоастрономії Радіоастрономічного інституту НАН України за цінні поради, і колективу Радіоастрономічної обсерваторії імені С. Я. Брауде за багаторічне забезпечення безперебійної роботи радіотелескопа УТР-2.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. McKee, C. F. and Ostriker, J. P., “A theory of the interstellar medium: three components regulated by supernova explosions in an inhomogeneous substrate.”, *The Astrophysical Journal*, vol. 218, pp. 148–169, 1977. doi:10.1086/155667.
2. Field, G. B., Goldsmith, D. W., and Habing, H. J., “Cosmic-Ray Heating of the Interstellar Gas”, *The Astrophysical Journal*, vol. 155, p. L149, 1969. doi:10.1086/180324.
3. Cox, D. P. and Smith, B. W., “Large-Scale Effects of Supernova Remnants on the Galaxy: Generation and Maintenance of a Hot Network of Tunnels”, *The Astrophysical Journal*, vol. 189, p. L105, 1974. doi:10.1086/181476.
4. Kulkarni, S. & Hejles, C., 1988 in *Galactic and Extragalactic Radio Astronomy*, ed: Verschuur, G.H., Kellerman, K.I., Springer-Verlag, Berlin, 95.
5. Reynolds, R. J., “A measurement of the hydrogen recombination rate in the diffuse interstellar medium”, *The Astrophysical Journal*, vol. 282, pp. 191–196, 1984. doi:10.1086/162190.
6. Lockman, F. J., “The H I halo in the inner galaxy.”, *The Astrophysical Journal*, vol. 283, pp. 90–97, 1984. doi:10.1086/162277.
7. Shibai, H. et al. “Large-Scale [C II] 158 Micron Emission from the Galaxy”, *The Astrophysical Journal*, vol. 374, p. 522, 1991. doi:10.1086/170141.
8. Shibai, H. et al. “[C II] Diffuse Emission Observed by IRTS”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, vol. 48, pp. L127–L131, 1996. doi:10.1093/pasj/48.6.L127.
9. Bennett, C.L., & Hinshaw, G., 1993, in 'Back to the Galaxy', ed. Holt, S.S. & Verter, F. (AIP Conf. Proc. 278), p257.
10. Heiles, C., “On the Origin of the Diffuse C<sup>+</sup> 158 Micron Line Emission”, *The Astrophysical Journal*, vol. 436, p. 720, 1994. doi:10.1086/174945.
11. Petuchowski, S. J. and Bennett, C. L., “Galactic Fine-Structure Lines: Morphologies of the Warm Ionized Interstellar Medium”, *The Astrophysical Journal*, vol. 405, p. 591, 1993. doi:10.1086/172390.

12. Tielens, A. G. G. M. and Hollenbach, D., “Photodissociation regions. I. Basic model.”, *The Astrophysical Journal*, vol. 291, pp. 722–746, 1985. doi:10.1086/163111.
13. Hollenbach, D. J., Takahashi, T., and Tielens, A. G. G. M., “Low-Density Photodissociation Regions”, *The Astrophysical Journal*, vol. 377, p. 192, 1991. doi:10.1086/170347.
14. Watson, W. D., Western, L. R., and Christensen, R. B., “A new, dielectronic-like recombination process for low temperatures and the radio recombination lines of carbon.”, *The Astrophysical Journal*, vol. 240, pp. 956–961, 1980. doi:10.1086/158309.
15. Spitzer, L., *Physical processes in the interstellar medium*. 1978. doi:10.1002/9783527617722.
16. Dalgarno, A. and McCray, R. A., “Heating and Ionization of H I Regions”, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 10, p. 375, 1972. doi:10.1146/annurev.aa.10.090172.002111.
17. 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.
18. Condon, J. J. and Ransom, S. M., *Essential Radio Astronomy*. 2016.
19. van de Hulst, H. C., “Radiogolven uit het wereldruim: II. Herkomst der radiogolvenRadiogolven uit het wereldruim: II. Herkomst der radiogolvenRadio waves from space.”, *Nederlandsch Tijdschrift voor Natuurkunde*, vol. 11, pp. 210–221, 1945.
20. Ewen, H. I. and Purcell, E. M., “Observation of a Line in the Galactic Radio Spectrum: Radiation from Galactic Hydrogen at 1,420 Mc./sec.”, *Nature*, vol. 168, no. 4270, p. 356, 1951. doi:10.1038/168356a0.
21. Muller, C. A. and Oort, J. H., “Observation of a Line in the Galactic Radio Spectrum: The Interstellar Hydrogen Line at 1,420 Mc./sec., and an Estimate of Galactic Rotation”, *Nature*, vol. 168, no. 4270, pp. 357–358, 1951. doi:10.1038/168357a0.

22. Shklovskii, I. S., “On the monochromatic radio-radiation of the galaxy and the possibility of detecting it”, *Astronomicheskii Zhurnal*, vol. 26, p. 10, 1949.
23. Weinreb, S., Barrett, A. H., Meeks, M. L., and Henry, J. C., “Radio Observations of OH in the Interstellar Medium”, *Nature*, vol. 200, no. 4909, pp. 829–831, 1963. doi:10.1038/200829a0.
24. Weaver, H., Williams, D. R. W., Dieter, N. H., and Lum, W. T., “Observations of a Strong Unidentified Microwave Line and of Emission from the OH Molecule”, *Nature*, vol. 208, no. 5005, pp. 29–31, 1965. doi:10.1038/208029a0.
25. Litvak, M. M., McWhorter, A. L., Meeks, M. L., and Zeiger, H. J., “Maser Model for Interstellar OH Microwave Emission”, *Physical Review Letters*, vol. 17, no. 15, pp. 821–826, 1966. doi:10.1103/PhysRevLett.17.821.
26. Kardashev, N. S., “On the Possibility of Detection of Allowed Lines of Atomic Hydrogen in the Radio-Frequency Spectrum.”, *Astronomicheskii Zhurnal*, vol. 36, p. 838, 1959.
27. Sorochenko, R. L. and Borodzich, É. V., “Detection of a Radio Line Due to Excited Hydrogen in the Nebula NGC 6618 (Omega)”, *Soviet Physics Doklady*, vol. 10, p. 588, 1966.
28. Dravskikh, A. F., Dravskikh, Z. V., Kolbasov, V. A., Mizezhnikov, G. S., Nikulin, D. E., and Shteinshleiger, V. B., “Investigating the 5-cm Line of Excited-Hydrogen Radiation with a Maser Amplifier”, *Soviet Physics Doklady*, vol. 10, p. 627, 1966.
29. Welch, W. J. and Marr, J., “Study of the H42 alpha (86 GHz) Recombination Line in W3(OH)”, *The Astrophysical Journal*, vol. 317, p. L21, 1987. doi:10.1086/184905.
30. Salas, P. et al., “LOFAR observations of decameter carbon radio recombination lines towards Cassiopeia A”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 467, no. 2, pp. 2274–2287, 2017. doi:10.1093/mnras/stx239.
31. 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.
- 32.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.
- 33.Bell, M. B. and Seaquist, E. R., “Radio Recombination Line Studies of M82 and Other Galaxies”, *The Astrophysical Journal*, vol. 223, pp. 378–385, 1978. doi:10.1086/156272.
- 34.Bell, M. B. and Seaquist, E. R., “Detection of radio recombination lines in the Seyfert galaxy MRK 668”, *The Astrophysical Journal*, vol. 238, pp. 818–822, 1980. doi:10.1086/158042.
- 35.Shaver, P. A., Churchwell, E., and Walmsley, C. M., “On the nature of the extragalactic radio recombination lines.”, *Astronomy and Astrophysics*, vol. 64, no. 1–2, pp. 1–8, 1978.
- 36.Morabito, L. K. et al., “Discovery of Carbon Radio Recombination Lines in M82”, *The Astrophysical Journal*, vol. 795, no. 2, 2014. doi:10.1088/2041-8205/795/2/L33.
- 37.Emig, K. L. et al., “The first detection of radio recombination lines at cosmological distances”, *Astronomy and Astrophysics*, vol. 622, 2019. doi:10.1051/0004-6361/201834052.
- 38.Hoglund, B. and Mezger, P. G., “Hydrogen Emission Line  $n_{110} \rightarrow n_{109}$ : Detection at 5009 Megahertz in Galactic H II Regions”, *Science*, vol. 150, no. 3694, pp. 339–340, 1965. doi:10.1126/science.150.3694.339.
- 39.Palmer, P., Zuckerman, B., Penfield, H., and Lilley, A. E., “Detection of a New Microwave Spectral Line”, *Nature*, vol. 215, no. 5096, pp. 40–41, 1967. doi:10.1038/215040a0.
- 40.Shaver, P. A., “Theoretical intensities of low frequency recombination lines.”, *Pramana*, vol. 5, pp. 1–28, 1975. doi:10.1007/BF02875147.



41. Pedlar, A. and Davies, R. D., “Low frequency recombination lines”, in *Radio Recombination Lines*, 1980, vol. 80, pp. 171–183. doi:10.1007/978-94-009-9024-1\_16.
42. Oonk, J. B. R., Alexander, E. L., Broderick, J. W., Sokolowski, M., and Wayth, R., “Spectroscopy with the Engineering Development Array: cold H<sup>+</sup> at 63 MHz towards the Galactic Centre”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 487, no. 4, pp. 4737–4750, 2019. doi:10.1093/mnras/stz950.
43. Pankonin, V., Walmsley, C. M., Wilson, T. L., and Thomasson, P., “A study of the partially ionized medium in the vicinity of the H II regions NGC 2024 and W3.”, *Astronomy and Astrophysics*, vol. 57, no. 3, pp. 341–351, 1977.
44. Kantharia, N. G., Anantharamaiah, K. R., and Goss, W. M., “VLA Observations of Hydrogen and Carbon Recombination Lines toward W3A at 1.4 GHz”, *The Astrophysical Journal*, vol. 504, no. 1, pp. 375–389, 1998. doi:10.1086/306070.
45. Crutcher, R. M., “Detection and significance of carbon recombination lines in diffuse interstellar clouds.”, *The Astrophysical Journal*, vol. 217, pp. L109–L112, 1977. doi:10.1086/182550.
46. Gordon, M. A. and Sorochenko, R. L., *Radio Recombination Lines. Their Physics and Astronomical Applications*, vol. 282. 2002. doi:10.1007/978-0-387-09604-9.
47. Shaver, P. A., Churchwell, E., and Rots, A. H., “Stimulated Recombination Line Emission from M82”, *Astronomy and Astrophysics*, vol. 55, p. 435, 1977.
48. Salgado, F. et al., “Low-frequency Carbon Radio Recombination Lines. I. Calculations of Departure Coefficients”, *The Astrophysical Journal*, vol. 837, no. 2, 2017. doi:10.3847/1538-4357/aa5d9e.
49. Salgado, F. et al., “Low-frequency Carbon Radio Recombination Lines. II. The Diffuse Interstellar Medium”, *The Astrophysical Journal*, vol. 837, no. 2, 2017. doi:10.3847/1538-4357/aa5d9a.
50. Konovalenko, A. A. and Sodin, L. G., “Neutral <sup>14</sup>N in the interstellar medium”, *Nature*, vol. 283, no. 5745, pp. 360–361, 1980. doi:10.1038/283360a0.

51. Blake, D. H., Crutcher, R. M., and Watson, W. D., “Identification of the anomalous 26.131-MHz nitrogen line observed towards Cas A”, *Nature*, vol. 287, no. 5784, pp. 707–708, 1980. doi:10.1038/287707a0.
52. Konovalenko, A. A. and Sodin, L. G., “The 26.13 MHz absorption line in the direction of Cassiopeia A”, *Nature*, vol. 294, no. 5837, pp. 135–136, 1981. doi:10.1038/294135a0.
53. Sorochenko, R. L. and Walmsley, C. M., “Radio Recombination Lines of Carbon C165 $\alpha$  and C166 $\alpha$  Towards Cas A”, *Astronomical and Astrophysical Transactions*, vol. 1, no. 1, pp. 31–40, 1991. doi:10.1080/10556799108244517.
54. Golyнкин, A. A. and Konovalenko, A. A., “Decameter-Wave Carbon Recombination Lines in the Dust Cloud L1407”, *Soviet Astronomy Letters*, vol. 17, p. 10, 1991.
55. Konovalenko, A. A., “Decameter excited-carbon lines in certain galactic objects”, *Soviet Astronomy Letters*, vol. 10, pp. 384–386, 1984.
56. Golyнкин, A. A. and Konovalenko, A. A., “Radio Recombination Lines of Highly Excited Carbon Near DR21 and S140”, *Soviet Astronomy Letters*, vol. 17, p. 7, 1991.
57. Anantharamaiah, K. R., Payne, H. E., and Erickson, W. C., “Detection of carbon recombination lines below 100 MHz towards the galactic centre and M16.”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 235, pp. 151–160, 1988. doi:10.1093/mnras/235.1.151.
58. 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.
59. 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.
60. Roshi, D. A., Kantharia, N. G., and Anantharamaiah, K. R., “Carbon recombination lines near 327 MHz. I. “Diffuse” C II regions in the Galactic

- Disk”, *Astronomy and Astrophysics*, vol. 391, pp. 1097–1113, 2002. doi:10.1051/0004-6361:20020899.
61. Konovalenko, A. A., Stepkin, S. V., and Mukha, D. V., “Detection Of Carbon Recombination Lines In The Direction Of Galactic Plane At Decametric Wavelengths”, *Long Wavelength Astrophysics*, 26<sup>th</sup> meeting of IAU, vol. 26, 2006.
  62. Baddi, R., “A Survey of Radio Recombination Lines Using the Ooty Radio Telescope at 328 MHz in the Inner Galaxy”, *The Astronomical Journal*, vol. 143, no. 2, 2012. doi:10.1088/0004-6256/143/2/26.
  63. Pedlar, A., Davies, R. D., Hart, L., and Shaver, P. A., “Studies of low-frequency recombination lines from the direction of the Galactic Centre and other galactic sources.”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 182, pp. 473–488, 1978. doi:10.1093/mnras/182.3.473.
  64. 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.
  65. Anantharamaiah, K. R., “Low density ionized gas in the inner galaxy - Interpretation of recombination line observations at 325 MHz.”, *Journal of Astrophysics and Astronomy*, vol. 6, pp. 203–226, 1985. doi:10.1007/BF02715006.
  66. Anantharamaiah, K. R., “On the origin of the Galactic ridge recombination lines”, *Journal of Astrophysics and Astronomy*, vol. 7, pp. 131–139, 1986. doi:10.1007/BF02714206.
  67. Roshi, D. A. and Anantharamaiah, K. R., “Hydrogen and carbon recombination lines towards the Galactic Centre near 328MHz”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 292, no. 1, pp. 63–70, 1997. doi:10.1093/mnras/292.1.63.
  68. Kantharia, N. G., Anantharamaiah, K. R., and Payne, H. E., “Carbon Recombination Lines between 34.5 and 770 MHz toward Cassiopeia A”, *The Astrophysical Journal*, vol. 506, no. 2, pp. 758–772, 1998. doi:10.1086/306266.

69. Asgekar, A. et al., “LOFAR detections of low-frequency radio recombination lines towards Cassiopeia A”, *Astronomy and Astrophysics*, vol. 551, 2013. doi:10.1051/0004-6361/201221001.
70. Oonk, J. B. R. et al., “Carbon and hydrogen radio recombination lines from the cold clouds towards Cassiopeia A”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 465, no. 1, pp. 1066–1088, 2017. doi:10.1093/mnras/stw2818.
71. Salas, P. et al., “Mapping low-frequency carbon radio recombination lines towards Cassiopeia A at 340, 148, 54, and 43 MHz”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 475, no. 2, pp. 2496–2511, 2018. doi:10.1093/mnras/stx3340.
72. Salas, P. et al., “Carbon radio recombination lines from gigahertz to megahertz frequencies towards Orion A”, *Astronomy and Astrophysics*, vol. 626, 2019. doi:10.1051/0004-6361/201834532.
73. Roshi, D. A. and Anantharamaiah, K. R., “Hydrogen Recombination Lines near 327 MHz. I. Distribution of Low-Density Ionized Gas in the Galactic Disk”, *The Astrophysical Journal*, vol. 535, no. 1, pp. 231–246, 2000. doi:10.1086/308813.
74. Roshi, D. A. and Anantharamaiah, K. R., “Hydrogen Recombination Lines near 327 MHz - II: A Galactic Plane Survey with a 2° x 6' Beam”, *Journal of Astrophysics and Astronomy*, vol. 22, no. 1, 2001. doi:10.1007/BF02933591.
75. Roshi, D. A. and Anantharamaiah, K. R., “Hydrogen Recombination Lines near 327 MHz. III. Physical Properties and Origin of the Low-Density Ionized Gas in the Inner Galaxy”, *The Astrophysical Journal*, vol. 557, no. 1, pp. 226–239, 2001. doi:10.1086/321586.
76. Roshi, D. A. and Kantharia, N. G., “Carbon recombination lines towards the Riegel-Crutcher cloud and other cold H I regions in the inner Galaxy”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 414, no. 1, pp. 519–528, 2011. doi:10.1111/j.1365-2966.2011.18418.x.
77. Roshi, D. A. et al., “Arecibo-Green Bank-LOFAR Carbon Radio Recombination Line Observations toward Cold H I Clouds”, *The Astrophysical Journal*, vol. 925, no. 1, 2022. doi:10.3847/1538-4357/ac35d8.

78. Emig, K. L. et al., "Searching for the largest bound atoms in space", *Astronomy and Astrophysics*, vol. 634, 2020. doi:10.1051/0004-6361/201936562.
79. Gottesman, S. T. and Gordon, M. A., "Radio Recombination Lines from Diffuse Interstellar Gas", *The Astrophysical Journal*, vol. 162, p. L93, 1970. doi:10.1086/180631.
80. Cesarsky, C. J. and Cesarsky, D. A., "Interpretation of Recombination-Line Emission from the Interstellar Medium", *The Astrophysical Journal*, vol. 169, p. 293, 1971. doi:10.1086/151142.
81. Shaver, P. A., "Interpretation of low-frequency recombination line observations of the interstellar medium.", *Astronomy and Astrophysics*, vol. 49, no. 1, pp. 1–16, 1976.
82. Gordon, M. A. and Cato, T., "A Longitude Survey of Radio Recombination Lines from the Diffuse Interstellar Medium", *The Astrophysical Journal*, vol. 176, p. 587, 1972. doi:10.1086/151660.
83. Hart, L. and Pedlar, A., "A survey of radio recombination line emission from the galactic plane", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 176, pp. 547–560, 1976. doi:10.1093/mnras/176.3.547.
84. Lockman, F. J., "A survey of ionized hydrogen in the plane of the Galaxy.", *The Astrophysical Journal*, vol. 209, pp. 429–444, 1976. doi:10.1086/154737.
85. Mezger, P. O., "The Galactic Extended Low-density H II Region and Its Relation to Star Formation and Diffuse IR Emission", *Astronomy and Astrophysics*, vol. 70, p. 565, 1978.
86. Mezger, P. G. & Smith, L. F. 1976, in *Stars and Galaxies from Observational Points of View*, ed. E. K. Kharadze, 369–382
87. Heiles, C., Reach, W. T., and Koo, B.-C., "Radio Recombination Lines from Inner Galaxy Diffuse Gas. II. The Extended Low-Density Warm Ionized Medium and the "Worm-ionized Medium"", *The Astrophysical Journal*, vol. 466, p. 191, 1996. doi:10.1086/177503.

88. Lockman, F. J., Pisano, D. J., and Howard, G. J., "Detection of 130 "Diffuse" Galactic H II Regions", *The Astrophysical Journal*, vol. 472, p. 173, 1996. doi:10.1086/178052.
89. Churchwell, E. and Walmsley, C. M., "Are the electron temperatures of H II regions a function of galactic radius?", *Astronomy and Astrophysics*, vol. 38, no. 3, pp. 451–454, 1975.
90. Pikel'Ner, S. B., "Heating of the Interstellar Gas by Subcosmic Rays, and the Formation of Clouds.", *Astronomicheskii Zhurnal*, vol. 44, p. 915, 1967.
91. Spitzer, L. and Tomasko, M. G., "Heating of H I Regions by Energetic Particles", *The Astrophysical Journal*, vol. 152, p. 971, 1968. doi:10.1086/149610.
92. Hjellming, R. M., Gordon, C. P., and Gordon, K. J., "Properties of Interstellar Clouds and the Inter-Cloud Medium", *Astronomy and Astrophysics*, vol. 2, p. 202, 1969.
93. Gordon, M. A., Brown, R. L., and Gottesman, S. T., "The Latitude Extent of Diffuse Ionization in the Galaxy", *The Astrophysical Journal*, vol. 178, pp. 119–124, 1972. doi:10.1086/151771.
94. Jenkins, E. B. and Tripp, T. M., "The Distribution of Thermal Pressures in the Interstellar Medium from a Survey of C I Fine-Structure Excitation", *The Astrophysical Journal Supplement Series*, vol. 137, no. 2, pp. 297–340, 2001. doi:10.1086/323326.
95. Riegel, K. W. and Crutcher, R. M., "Neutral hydrogen self-absorption in a large region toward the galactic center.", *Astronomy and Astrophysics*, vol. 18, pp. 55–69, 1972.
96. 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.
97. Vydula, A. K. et al., "Low-Frequency Radio Recombination Lines Away From the Inner Galactic Plane", arXiv e-prints, 2023. doi:10.48550/arXiv.2302.14185.

98. 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., Shevchuk, N., Koval, A., Vasylieva, I., Mylostna, K., Skoryk, A., Shevtsova, A., Volvach, Y., Vasylykovsky, 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.
99. Braude, S. I., Men, A. V., and Sodin, L. G., “The UTR-2 decametric-wave radio telescope”, *Antenny*, vol. 26, pp. 3–15, 1978.
100. 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.
101. Men, A. V. et al., “Design principles and characteristics of the antennas of the UTR-2 radio telescope”, *Antenny*, vol. 26, pp. 15–57, 1978.
102. Abranin, E. P., Bruk, Y. M., Zakharenko, V. V., and Konovalenko, O. O., “Structure and Parameters of New System of Antenna Amplification of Radio Telescope UTR-2”, *Radio Physics and Radio Astronomy*, vol. 2, p. 95, 1997.
103. Konovalenko A. A. Radiospektrometr dlya poiska slabykh spektralnykh liniy. Pribory i tehnika eksperimenta (Instruments and Experimental Techniques), N 6, 123—126 (1981) [in Russian].
104. Golyntkin A. A. Pribory i tehnika eksperimenta (Instruments and Experimental Techniques), N 1, 101—103 (1989) [in Russian].
105. Stepkin, S. V., “Digital Sign Correlometer for Radio Astronomical Spectroscopy”, *Radio Physics and Radio Astronomy*, vol. 1, p. 255, 1996.

106. 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.
107. 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.
108. 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., Dorovskyy, 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., Koshovyy, 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.
109. Weinreb S., *Proc. IRE*, 49, № 6, p. 1283 (1961).
110. Konovalenko, O. O., Sokolov, K. P., and Stepkin, S. V., “Determination of Optimum Operating Frequencies for Observations with UTR-2 Radio Telescope



- in the Sky Surveying Mode”, *Radio Physics and Radio Astronomy*, vol. 2, p. 188, 1997.
111. Zakharenko, V., Konovalenko, A., Zarka, P., Ulyanov, O., Sidorchuk, M., Stepkin, S., Koliadin, V., Kalinichenko, N., Stanislavsky, A., Dorovskyy, 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., Vasylykivskyi, Y., Vavriv, D., Vinogradov, V., Kozhin, R., Kravtsov, A., Bulakh, E., Kuzin, A., Vasilyev, A., Ryabov, V., Reznichenko, A., Bortsov, V., Lisachenko, V., Kvasov, G., Mukha, D., Litvinenko, G., Brazhenko, A., Vashchishin, R., Pylaev, O., Koshovyy, V., Lozinsky, A., Ivantyshyn, O., Rucker, H. O., Panchenko, M., 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.
  112. Kozhin, R. V., Vinogradov, V. V., and Vavriv, D. M., “Low-noise, high dynamic range digital receiver/spectrometer for radio astronomy applications”, in *MSMW Symp. Proc*, 2007, pp. 736–738.
  113. 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.
  114. 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.
  115. Konovalenko, A. A., “Review of Decameter Wave Recombination Lines: Problems and Methods”, in *IAU Colloq. 125: Radio Recombination Lines: 25 Years of Investigation*, 1990, vol. 163, p. 175. doi:10.1007/978-94-009-0625-9\_17.

116. Звіт з НДР «Інструментальне та інформаційне приєднання радіотелескопів УТР-2, УРАН, ГУРТ до світових мереж низькочастотної радіоастрономії» (шифр: РАДІОТЕЛЕСКОП, № держ. реєстрації 0118U000561), 2018 – 2022 pp.).
117. Ershov, A. A., Plyashov, Y. P., Lekht, E. E., Smirnov, G. T., Solodkov, V. T., and Sorochenko, R. L., “Low-frequency (42, 57, 84 MHz) excited-carbon lines toward Cassiopeia A”, *Pisma v Astronomicheskii Zhurnal*, vol. 10, pp. 833–845, 1984.
118. Ershov, A. A., Lekht, E. E., Smirnov, G. T., and Sorochenko, R. L., “Excited Carbon-Level Populations and the Low-Frequency Radio Line Regions Toward Cassiopeia-A”, *Soviet Astronomy Letters*, vol. 13, p. 8, 1987.
119. Payne, H. E., Anantharamaiah, K. R., and Erickson, W. C., “High Rydberg State Carbon Recombination Lines toward Cassiopeia A: Physical Conditions and a New Class of Models”, *The Astrophysical Journal*, vol. 430, p. 690, 1994. doi:10.1086/174441.
120. Konovalenko, A. A., “Decameter-wavelength carbon recombination lines toward Cassiopeia A”, *Soviet Astronomy Letters*, vol. 10, pp. 353–356, 1984.
121. Payne, H. E., Anantharamaiah, K. R., and Erickson, W. C., “Stimulated Emission of Carbon Recombination Lines from Cold Clouds in the Direction of Cassiopeia A”, *The Astrophysical Journal*, vol. 341, p. 890, 1989. doi:10.1086/167547.
122. Ponomarev, V. O. and Sorochenko, R. L., “The population of highly excited levels of carbon atoms”, *Soviet Astronomy Letters*, vol. 18, no. 6, p. 215, 1992.
123. V. V. Kitaev, G. T. Smirnov, R. L. Sorochenko, and E. E. Lekht, *Turkish J. Phys.* 18, 908 (1994).
124. Anantharamaiah, K. R., Erickson, W. C., Payne, H. E., and Kantharia, N. G., “High Rydberg State Carbon Recombination Lines toward Cassiopeia A: 332 MHz VLA Observations and Comparison with H i and Molecular Lines”, *The Astrophysical Journal*, vol. 430, p. 682, 1994. doi:10.1086/174440.

125. 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.
126. 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.
127. Smirnov, G. T., Sorochenko, R. L., and Walmsley, C. M., “The S 140/L 1204 complex: radio recombination lines of hydrogen, carbon and sulphur.”, *Astronomy and Astrophysics*, vol. 300, p. 923, 1995.
128. Smirnov, G. T., Sorochenko, R. L., and Kitaev, V. V., “A search for recombination lines at 42 MHz toward S140.”, *Soviet Astronomy Letters*, vol. 18, p. 192, 1992.
129. Dickey, J. M. and Lockman, F. J., “H I in the galaxy.”, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 28, pp. 215–261, 1990. doi:10.1146/annurev.aa.28.090190.001243.
130. 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.
131. Walmsley, C. M. and Watson, W. D., “The influence of dielectronic-like recombination at low temperatures on the interpretation of interstellar, radio recombination lines of carbon”, *The Astrophysical Journal*, vol. 260, pp. 317–325, 1982. doi:10.1086/160256.
132. Hollenbach, D. J. and Tielens, A. G. G. M., “Dense Photodissociation Regions (PDRs)”, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 35, pp. 179–216, 1997. doi:10.1146/annurev.astro.35.1.179.
133. Garay, G., Lizano, S., Gómez, Y., and Brown, R. L., “VLA Observations of Hydrogen and Helium Recombination Lines from Partially and Fully Ionized Gas in S88B”, *The Astrophysical Journal*, vol. 501, no. 2, pp. 710–722, 1998. doi:10.1086/305850.

134. Wyrowski, F., Walmsley, C. M., Goss, W. M., and Tielens, A. G. G. M., “The Location of the Dense and Ionized Gas in the NGC 2023 Photon-dominated Region”, *The Astrophysical Journal*, vol. 543, no. 1, pp. 245–256, 2000. doi:10.1086/317096.
135. Sorochenko, R. L., “Radio recombination lines of carbon as a tool for investigation of molecular clouds”, *Astronomical and Astrophysical Transactions*, vol. 11, no. 3, pp. 199–214, 1996. doi:10.1080/10556799608205467.
136. 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.
137. Nakagawa, T. et al., “Far-Infrared [C II] Line Survey Observations of the Galactic Plane”, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, vol. 115, no. 2, pp. 259–269, 1998. doi:10.1086/313082.
138. Kalberla, P. M. W. and Kerp, J., “The H I Distribution of the Milky Way”, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 47, no. 1, pp. 27–61, 2009. doi:10.1146/annurev-astro-082708-101823.
139. Haffner, L. M., Reynolds, R. J., Tufte, S. L., Madsen, G. J., Jaehnig, K. P., and Percival, J. W., “The Wisconsin H $\alpha$  Mapper Northern Sky Survey”, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, vol. 149, no. 2, pp. 405–422, 2003. doi:10.1086/378850.
140. Cordes, J. M. and Lazio, T. J. W., “NE2001. I. A New Model for the Galactic Distribution of Free Electrons and its Fluctuations”, arXiv e-prints, 2002. doi:10.48550/arXiv.astro-ph/0207156.
141. Wolfire, M. G., McKee, C. F., Hollenbach, D., and Tielens, A. G. G. M., “Neutral Atomic Phases of the Interstellar Medium in the Galaxy”, *The Astrophysical Journal*, vol. 587, no. 1, pp. 278–311, 2003. doi:10.1086/368016.
142. Dickey, J. M., “The Outer Disk of the Milky Way Seen in  $\lambda$ 21 cm Absorption”, *The Astrophysical Journal*, vol. 693, no. 2, pp. 1250–1260, 2009. doi:10.1088/0004-637X/693/2/1250.

143. Heiles, C. and Troland, T. H., “The Millennium Arecibo 21 Centimeter Absorption-Line Survey. II. Properties of the Warm and Cold Neutral Media”, *The Astrophysical Journal*, vol. 586, no. 2, pp. 1067–1093, 2003. doi:10.1086/367828.
144. Meyer, D. M., Lauroesch, J. T., Heiles, C., Peek, J. E. G., and Engelhorn, K., “A Cold Nearby Cloud inside the Local Bubble”, *The Astrophysical Journal*, vol. 650, no. 1, pp. L67–L70, 2006. doi:10.1086/508658.
145. Heiles, C., “New Temperatures of Diffuse Interstellar Gas: Thermally Unstable Gas”, *The Astrophysical Journal*, vol. 551, no. 1, pp. L105–L108, 2001. doi:10.1086/319844.
146. Pietz, J., Kerp, J., Kalberla, P. M. W., Burton, W. B., Hartmann, D., and Mebold, U., “The Galactic X-ray halo”, *Astronomy and Astrophysics*, vol. 332, pp. 55–70, 1998.
147. Kerp, J., “A search for soft X-ray emission associated with prominent high-velocity-cloud complexes”, *Astronomy and Astrophysics*, vol. 342, pp. 213–232, 1999. doi:10.48550/arXiv.astro-ph/9810307.
148. Wilms, J., Allen, A., and McCray, R., “On the Absorption of X-Rays in the Interstellar Medium”, *The Astrophysical Journal*, vol. 542, no. 2, pp. 914–924, 2000. doi:10.1086/317016.
149. Kalberla, P. M. W., “Dark Matter in the Milky Way. I. The Isothermal Disk Approximation”, *The Astrophysical Journal*, vol. 588, no. 2, pp. 805–823, 2003. doi:10.1086/374330.
150. Braun, R. and Thilker, D. A., “The WSRT wide-field H I survey. II. Local Group features”, *Astronomy and Astrophysics*, vol. 417, pp. 421–435, 2004. doi:10.1051/0004-6361:20034423.
151. Diplas, A. and Savage, B. D., “Neutral Hydrogen in the Outer Galaxy”, *The Astrophysical Journal*, vol. 377, p. 126, 1991. doi:10.1086/170341.
152. Burton, W. B. and Gordon, M. A., “Carbon monoxide in the Galaxy. III. The overall nature of its distribution in the equatorial plane.”, *Astronomy and Astrophysics*, vol. 63, no. 1–2, pp. 7–27, 1978.

153. Lockman, F. J., “The H I halo in the inner galaxy.”, *The Astrophysical Journal*, vol. 283, pp. 90–97, 1984. doi:10.1086/162277.
154. Burton, W. B. and de Lintell Hekkert, P., “The shape of the outer-Galaxy H I layer. I – Atlas of volume densities in cuts through a composite, galactocentric data cube.”, *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, vol. 65, pp. 427–463, 1986.
155. Fejes, I. and Wesselius, P. R., “The large-scale distribution of low-velocity hydrogen gas at high galactic latitudes.”, *Astronomy and Astrophysics*, vol. 24, pp. 1–13, 1973.
156. Gosachinskii, I. V., Il'in, G. N., and Prozorov, V. A., “The Structure of Galactic Gas at High Latitudes: The Southern Polar Cap”, *Astronomy Letters*, vol. 30, pp. 232–239, 2004. doi:10.1134/1.1695083.
157. Berkhuijsen, E. M., Haslam, C. G. T., and Salter, C. J., “Are the galactic loops supernova remnants?”, *Astronomy and Astrophysics*, vol. 14, p. 252, 1971.
158. Makiuti, S., “Diffuse far-infrared [C II] line emission from high Galactic latitude”, *Astronomy and Astrophysics*, vol. 382, pp. 600–609, 2002. doi:10.1051/0004-6361:20011626.
159. Звіт з НДР «Детектування та діагностика міжзоряних плазмових утворень, що поглинають та трансформують нетеплове низькочастотне космічне радіовипромінювання» (шифр: МІЖЗІР'Я, № держ. реєстрації 0122U002581), 2022 р.
160. Vasykivskyi, 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.

## ДОДАТОК А

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА 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., **Vasytkivskiy, 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., **Vasytkovsky, 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., Koshovyy, 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., Dorovskyy, 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., Koshovyy, V. V., Ivantyshyn, C. L., Lozinsky, A. B., Kharchenko, B. S., Vasylieva, I. Y., Kravtsov, I. P., **Vasytkivskiy, 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., **Vasytkivskiy, 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., **Vasylykivskiy, 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. **Vasylykivskiy, 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. **Vasylykivskiy, 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., **Vasylykivskiy, 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”, 50<sup>th</sup> 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, 2<sup>nd</sup> 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.

## АПРОБАЦІЯ МАТЕРІАЛІВ 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;
- IX 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-та 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.