

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ В.Н. КАРАЗІНА

СКОРИК АНАСТАСІЯ ОЛЕКСАНДРІВНА

УДК 523.4-77

ТОНКА СТРУКТУРА РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ ПУЛЬСАРІВ  
У ДЕКАМЕТРОВОМУ ДІАПАЗОНІ

**01.03.02** – астрофізика, радіоастрономія

АВТОРЕФЕРАТ  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Харків – 2018



Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Радіоастрономічному інституті Національної академії наук України.

**Науковий керівник:**

кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник

**УЛЬЯНОВ ОЛЕГ МИХАЙЛОВИЧ**

Радіоастрономічний інститут НАН України, завідуючий відділом декаметрової радіоастрономії

**Офіційні опоненти:**

доктор фізико-математичних наук, професор

**ЗАХОЖАЙ ВОЛОДИМИР АНАТОЛІЙОВИЧ**

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, професор кафедри астрономії та космічної інформатики

кандидат фізико-математичних наук, старший дослідник

**ТРОФИМЕНКО СЕРГІЙ ВАЛЕРІЙОВИЧ**

ННЦ "Харківський фізико-технічний інститут", старший науковий співробітник

Захист відбудеться «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 р. о \_\_\_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.051.02 Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна (Україна, 61022, м. Харків, майдан Свободи, 4, ауд. 3-9).

З дисертацією можна ознайомитись у Центральній науковій бібліотеці Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна (Україна, 61022, м. Харків, майдан Свободи, 4).

Автореферат розісланий «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Ю. В. Аркуша



## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Пульсари були відкриті понад 50 років тому, але й досі не існує єдиної завершеної моделі магнітосфери пульсарів та когерентного механізму генерації їхнього радіовипромінювання. Основні питання полягають у тому, які лінійні розміри мають ділянки випромінювання компонент імпульсів в магнітосфері пульсара та на якій відстані від поверхні нейтронної зірки вони розташовані.

Пульсари — це точкові джерела радіовипромінювання. Радіус нейтронної зірки складає 10 км, а радіус магнітосфери не перевищує 300 000 км. Тож методами наземних радіоінтерферометричних спостережень неможливо отримати кутове розділення магнітосфер пульсарів. Для побудови єдиної моделі магнітосфери пульсарів необхідно проводити аналіз імпульсного радіовипромінювання в широкому діапазоні частот.

Одним із параметрів імпульсного випромінювання, за допомогою якого можливо просторово розділити магнітосферу, є характерний час когерентності тонкої структури  $\Delta\tau$ . Тонка структура — це флуктуації інтенсивності, які відбуваються в межах індивідуального імпульсу на інтервалах часу порядку десятків мілісекунд. На таких коротких інтервалах варіацію параметрів радіовипромінювання можуть зумовлювати тільки швидкі процеси всередині самої магнітосфери або у щонайближчому просторі навколо нейтронної зірки. Час когерентності дозволяє оцінити максимальні лінійні розміри променя випромінювання  $\Delta s \leq \Delta\tau \cdot c$ , де  $c$  — це швидкість світла у вакуумі. Таким чином, індивідуальні імпульси із наявною тонкою структурою виступають в ролі зондів, які «просвічують» магнітосферу пульсара із короткою експозицією.

На радіовипромінювання сильно впливає середовище поширення, яке можливо розділити на характерні ділянки від джерела випромінювання до реєстрації сигналу земними приладами. До них відносяться магнітосфера пульсара із щільною та сильно намагніченою електрон-позитронною плазмою, протяжне міжзоряне середовище, міжпланетне середовище, заповнене сонячним вітром, та турбулентна іоносфера Землі. Точно не відомо, на якій висоті у магнітосфері пульсара відбувається випромінювання, та яким чином воно трансформується, проходячи крізь електрон-позитронну плазму. На Землі реєструється те випромінювання, яке вийшло з висоти, що відповідає радіусу критичної поляризації. Але навіть вище цього радіусу, й до самої границі з міжзоряним середовищем, магнітосферна плазма продовжує впливати на когерентне випромінювання.

Параметри імпульсів тісно пов'язані із ефектами поширення, до яких відносяться затримка сигналу на низьких частотах в наслідок дисперсії у плазмовому середовищі, розсіяння сигналу на просторових неоднорідностях електронної концентрації та обертання площини поляризації сигналу. Параметр міра дисперсії (МД)  $DM$ , який характеризує інтегральну кількість вільних електронів на промені зору  $n_e(l)$  та входить у вираз дисперсійної затримки, дозволяє розділити магнітосферу пульсара вздовж променя зору та дати оцінки висоти області

випромінювання спираючись на конкретну модель просторового розподілення зарядів в магнітосфері.

Декаметровий діапазон спостережень є перспективним для вивчення тонких проявів ефектів поширення в імпульсному випромінювання пульсарів. Вплив ефектів поширення на космічні сигнали збільшується з пониженням частоти. З одного боку, це ускладнює обробку сигналу, яка потребує значних ресурсів обчислювальної техніки. З іншого боку, ефекти поширення у декаметровому діапазоні проявляються максимально контрастно. Аномально інтенсивні імпульси, які спостерігаються у декаметровому діапазоні, дозволяють вивчати тонку структуру індивідуальних імпульсів. Крім того, дуже велика ефективна площа радіотелескопу УТР-2, на якому проводяться всі спостереження в даній роботі, дозволяє отримувати рекордну, як для декаметрового діапазону, часову роздільну здатність сигналів.

Таким чином, дослідження тонкої структури загалом, а також конкретно у декаметровому діапазоні є актуальною задачею у розрізі вивчення механізму когерентного радіовипромінювання пульсарів та побудові єдиної моделі магнітосфери.

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

- «Дослідження об'єктів Всесвіту методами низькочастотної радіоастрономії» (№ держреєстрації 0112U000034);
- «Розробка та впровадження елементів і систем великих декаметрових антен» (№ держреєстрації 0113U002048);
- «Створення та використання елементів сучасних радіоастрономічних засобів України УТР-2, УРАН, ГУРТ у вітчизняних і міжнародних низькочастотних астрофізичних дослідженнях» (№ держреєстрації 0116U00);
- «Розробка та впровадження елементів і систем великих декаметрових антен» (№ держреєстрації 0116U002159);
- «Створення та використання елементів сучасних радіоастрономічних засобів України УТР-2, УРАН, ГУРТ у вітчизняних і міжнародних низькочастотних астрофізичних дослідженнях» (№ держреєстрації 0115U004084).

**Мета та завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є досягнення максимально можливої просторової роздільної здатності ділянки випромінювання у магнітосферах пульсарів у декаметровому діапазоні. Для досягнення поставленої мети сформульовано наступні ключові завдання:

- розробити методи пошуку аномально інтенсивних імпульсів пульсарів на декаметровому радіотелескопі УТР-2 та методи обробки даних з максимальною часовою роздільною здатністю;
- дослідити існування тонкої структури та оцінити її параметри у декаметровому діапазоні у найближчих до Землі пульсарів;
- вивчити вплив середовища поширення на параметри тонкої структури у декаметровому діапазоні, що включає оцінку характерної сталої часу

розсіяння та точного значення міри дисперсії для кожного імпульсу та його окремих компонент.

**Об'єктом дослідження** є радіовипромінювання аномально інтенсивних імпульсів пульсарів J0243+6257, J0814+7429 та J0953+0755.

**Предметом дослідження** є параметри тонкої структури, міра дисперсії та стала характерного часу розсіяння радіовипромінювання пульсарів J0243+6257, J0814+7429 та J0953+0755 у декаметровому діапазоні.

**Методи дослідження.** Для розв'язання поставлених у дисертації задач на радіотелескопі УТР-2 проводились радіоастрономічні спостереження з високою часовою роздільною здатністю. Були використані методи спектрального та кореляційного аналізу даних спостережень. Для компенсації дисперсійної затримки сигналу використовувались постдетекторний та когерентний методи. За допомогою деконволюції імпульсів з модельною імпульсною характеристикою середовища поширення в рамках моделі тонкого фазового екрану усувався вплив розсіяння на сигнал.

#### **Наукова новизна одержаних результатів.**

1. Вперше зареєстровано швидку зміну параметру міра дисперсії на коротких інтервалах часу в межах індивідуального імпульсу пульсара J0953+0755. За допомогою ефекту, що спостерігається, є можливим розділити магнітосферу пульсара вздовж променя зору.

2. У пульсара J0953+0755 вперше у декаметровому діапазоні виявлено тонку структуру радіовипромінювання з часом когерентності 1 мс. Дано оцінку ширини ділянки випромінювання в його магнітосфері тонких компонент імпульсу.

3. У пульсара J0243+6257 вперше проведено аналіз аномально інтенсивних імпульсів. Дано оцінку сталої часу розсіяння пульсара J0243+6257 у декаметровому діапазоні, яка наразі є першою та єдиною в широкому діапазоні радіочастот. Також виявлено, що в радіовипромінюванні присутні два масштаби когерентності (на частотах 25.5 та 28.5 МГц короткий масштаб дорівнює 15 та 12 мс, а довгий масштаб — 21 та 17 мс).

4. У пульсара J0814+7429 вперше зафіксовано два масштаби когерентності радіовипромінювання (на частотах 22.5 та 25.5 МГц короткий масштаб дорівнює 10 та 7 мс, а довгий масштаб — 13 та 13.5 мс). За допомогою методів деконволюції показано, що широкі компоненти аномально інтенсивних імпульсів складаються з серії коротких компонент. Також знайдена тонка структура радіовипромінювання цього пульсара, за допомогою якої дано оцінку лінійного розміру ділянки випромінювання в його магнітосфері.

5. Запропоновано новий метод прискорення постдетекторного та когерентного усунення дисперсійної затримки, який полягає у складанні послідовних кадрів обробки сигналу, що вирішує проблему «поганих відліків» на межах кадру та дозволяє проводити обробку сигналу майже вдвічі швидше. Також запропоновано метод підвищення контрасту кореляційних функцій для ефективного пошуку тонкої структури радіовипромінювання у декаметровому діапазоні.

**Практичне значення отриманих результатів.** Результати досліджень розширюють діапазон вивчення тонкої структури радіовипромінювання пульсарів до декаметрових хвиль. Прискорені методи постдетекторного та когерентного усунення дисперсійної затримки можуть бути успішно застосовані в широкому спектрі задач для обробки пульсарів та інших імпульсних радіоджерел. Отримані оцінки характерного часу розсіяння на низьких частотах можуть бути використані для побудови більш точної моделі середовища поширення у напрямках на пульсари, що досліджуються в даній роботі. Отримані оцінки лінійних розмірів ділянки випромінювання тонких компонент імпульсів можуть бути використані для побудови та уточнювання моделі когерентного радіовипромінювання пульсарів загалом.

**Особистий внесок автора** є вагомим на всіх етапах і полягає в активній участі у зборі, аналізі та систематизації літературних даних за темою дисертації; у проведенні радіоастрономічних спостережень на декаметровому радіотелескопі УТР-2, в написанні програм обробки даних спостережень та аналізі й інтерпретації результатів обробки спостережень. Автор брала участь у постановці задач, аналізі, обговоренні й узагальненні отриманих результатів, формулюванні висновків. Автор готувала матеріали для публікацій та брала участь у написанні статей.

Автор вдячна науковому керівнику к. ф.-м. н. Ульянову О.М. за допомогу у постановці задач та обговоренні отриманих результатів, колективну РІ НАНУ за можливість проводити дослідження на унікальному радіотелескопі УТР-2, колективу НДІ Астрономії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна за допомогу в обговоренні результатів дисертації, а також своїй родині за терпіння та підтримку на всіх етапах навчання та захисту дисертації.

**Апробація результатів дисертації.** Результати дисертаційної роботи були представлені у 14 доповідях на таких вітчизняних та міжнародних наукових конференціях:

- Ventspils International Radio Astronomy Conference (Ventspils, Latvia, 13 — 15 August, 2012);
- International Astronomical Union Symposium No. 291 “Neutron Stars and Pulsars: Challenges and Opportunities After 80 Years” (Beijing, China, 20 — 31 August, 2012) — 2 доповіді;
- 1th Ukrainian conference «Electromagnetic Methods of Environmental Studies» (Kharkiv, Ukraine, 26 — 27 September, 2012);
- XII Kharkiv Young Scientist Conference on «Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics» (Kharkiv, Ukraine, 4 — 7 December, 2012);
- 13-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School «Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology and Gravitation, Cosmomicrophysics, Radioastronomy and Astrobiology» (Odessa, Ukraine, 19 — 25 August, 2013);
- The COSPAR Symposium: «Cosmic Magnetic Fields: Legacy of A.B. Severny» (Nauchny, Ukraine, 2 — 6 September, 2013);
- 44th Young European Radio Astronomers Conference (Torun, Poland, 8 — 12 September, 2014);



- 14th Kharkiv Young Scientist Conference on Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics (Kharkiv, Ukraine, 14 — 17 October, 2014);
- 10th International Conference on Antenna Theory and Techniques (Kharkiv, Ukraine, 21 — 24 April, 2015);
- 45th Young European Radio Astronomers Conference (Ventspils, Latvia, 19 — 21 August, 2015);
- International Young Scientists Forum on Applied Physics (Dnipropetrovsk, Ukraine, 29 September – 2 October, 2015);
- II International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (Kharkiv, Ukraine, 10 — 14 October, 2016);
- 2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (Lviv, Ukraine, 17 — 20 October, 2017);

**Публікації.** Результати дисертації опубліковані у 25 наукових працях: 10 статей у фахових вітчизняних і міжнародних періодичних виданнях [1–10] та 14 тез доповідей наукових конференцій [11–24], додатково результати дисертаційної роботи висвітлені у публікації [25].

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків та списку використаних джерел. Загальний об'єм роботи складає 156 сторінок. Вона містить 35 рисунків та список використаних джерел з 172 найменувань на 18 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У **вступі** дисертаційної роботи обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету та задачі досліджень та методи їх досягнення, викладено наукову новизну та практичне значення результатів, показано особистий внесок дисертанта.

**Перший розділ** присвячено аналізу наукової літератури за темою дисертації. В ньому надані основні відомості про пульсари та моделі генерації когерентного випромінювання пульсарів. Зазначено, що єдиної моделі генерації наразі не існує та основні відкриті питання полягають в тому, на якій відстані від поверхні нейтронної зірки народжується випромінювання.

В цьому розділі систематизовано знання про різні масштаби тонкої структури радіовипромінювання пульсарів, що спостерігаються. Наведено загальні властивості тонкої структури, а також перераховано ті питання, що потребують додаткового вивчення. Викладено різні моделі, які пояснюють виникнення тонкої структури.

В першому розділі дано опис середовища поширення, а також ефектів, які впливають на імпульсне випромінювання пульсарів. До цих ефектів відносяться розсіяння на просторових неоднорідностях електронної щільності на промені зору, частотна дисперсійна затримка сигналу та ефект Фарадея. У роботі, головним чином, розглядаються перші два ефекти.

**Другий розділ** дисертаційної роботи містить оригінальну методику спостережень та алгоритми обробки сигналів пульсарів, які є необхідними для пошуку тонкої структури радіовипромінювання пульсарів у декаметровому діапазоні хвиль. В цьому розділі також описані пульсари, які є кращими кандидатами для таких досліджень. Показано, що у декаметровому діапазоні тонку структуру є можливим вивчати тільки у аномально інтенсивних імпульсів, що спостерігаються у низки близьких до Землі пульсарів.

Всі спостереження та аналіз даних проведені у декаметровому діапазоні на найбільшому в світі (вважаючи ефективну площу) декаметровому радіотелескопі УТР-2 з реєстрацією сигналу у хвильовому вигляді. Зазвичай реєстрація індивідуальних імпульсів на низьких частотах майже неможлива через ряд особливостей діапазону. До них відносяться сильні радіозавади, висока яскравість фону Галактики, сильно виражені ефекти поширення та низькочастотний завал спектру пульсарів. Тож низький рівень С/Ш індивідуальних імпульсів не дозволяє проводити їхній аналіз. Однак, деякі пульсари випромінюють **аномально інтенсивні імпульси** (АІІ), чия інтенсивність в десятки або сотні разів перевищує інтенсивність середньостатистичних імпульсів. Завдяки ним є можливим досліджувати тонку структуру імпульсів пульсарів у декаметровому діапазоні.

Безумовні переваги цього діапазону полягають у відносно широкій смузі реєстрації  $\Delta f / f_c = 1.22$  та високому контрасті ефектів поширення (час дисперсійної затримки залежить від частоти як  $\tau_{DM} \sim f^{-2}$ , час розсіяння –  $\tau_{sc} \sim f^{-4}$ ). Завдяки цьому є доцільним проводити спектральний аналіз у межах смуги реєстрації. Також надзвичайно велика ефективна площа телескопа УТР-2 дозволяє реєструвати сигнал з рекордною в цьому діапазоні часовою роздільною здатністю, оскільки мінімальний для реєстрації спектральний потік випромінювання із заданим співвідношенням С/Ш  $SNR$  дорівнює: 
$$S(f) = \frac{SNR \cdot kT}{A_{eff}(f) \sqrt{\Delta t \Delta f}}$$

погіршується квадратично зі зменшенням ефективної площі:  $\Delta t \sim A_{eff}^{-2}$ .

У декаметровому діапазоні гостро стоїть проблема усунення дисперсійної затримки. Затримка між частотами  $f_H$  та  $f_L$  характеризується формулою:  $\Delta\tau_{DM}(f_i) = C DM (f_L^{-2} - f_H^{-2})$ , де  $DM$  – МД,  $C = 2\pi e^2 m_e^{-1} c^{-1}$  – коефіцієнт,  $e$  — заряд електрона,  $m_e$  – маса спокою електрона,  $c$  – швидкість світла у вакуумі. З формули видно, що навіть для найближчих до Землі пульсарів з мінімальною МД затримка між крайніми частотами реєстрації досягає суттєвих значень. Так максимальна затримка поширення сигналу між частотами 18 та 30 МГц у пульсара J0814+7429 (МД = 5.75 пк·см<sup>-3</sup>) складає приблизно 40 с. Для того, щоб після компенсації дисперсії отримати неспотворений сигнал у повній частотній смузі на проміжку часу  $T$ , необхідно захопити кадр даних, який має ширину щонайменше  $T + 80$  с.

Існує два методи усунення дисперсійної затримки: постдетекторний та когерентний. До повного масиву даних спостережень у вигляді динамічних спектрів був застосований постдетекторний метод. Цей метод погіршує первинну часову

роздільну здатність. Тож для кожного окремого АП (які були обрані візуально після первинної обробки) застосовували когерентний метод усунення дисперсії. Когерентний метод є необхідним для пошуку та аналізу тонкої структури імпульсів, а також для визначення МД з високою точністю. Він полягає у компенсації комплексної передатної функції плазмового середовища  $I \exp(-ik(\omega)z)$  (де  $k(\omega)$  – модуль хвильового вектора у середовищі поширення та  $z$  – відстань вздовж променя зору), яку розкладають у ряд Тейлора у відносно вузьких спектральних смугах  $\Delta\omega$  навколо центральної частоти  $\omega_0$ . Апаратна точність методу залежить від кількості членів ряду Тейлора, що враховано. Однак, принципово для оцінки МД є точність, яка залежить від фізичних параметрів середовища поширення, а саме від характерної сталої розсіяння  $\tau_{sc}(f)$  на частоті  $f$ . Ця точність розраховується як:

$\delta DM(f) = \tau_{sc}(f) C^{-1} (f_L^{-2} - f_H^{-2})^{-1}$ . У декаметровому діапазоні у смузі реєстрації 18 — 30 МГц для близьких до Землі пульсарів ця точність складає  $\sim 10^{-4}$  пк·см<sup>-3</sup>.

Як у постдетекторному, так і в когерентному алгоритмах виникає проблема «поганих відліків»: це втрата широкосмугової інформації на межах кадру обробки. Оскільки під час аналізу неможливо охопити повний масив даних, необхідно розбивати його на окремі кадри обробки. У постдетекторному алгоритмі після зсування частотних каналів  $\Delta f$  динамічного спектру на час, зворотній до дисперсійної затримки  $-\tau_{DM}(\Delta f)$ , на межах динамічного спектру з'являються «прогалини», в яких втрачено широкосмуговий сигнал. Теж саме відбувається і в когерентному алгоритмі: після внесення зворотного фазового зсуву  $\exp(-i\varphi_{DM})$  у дані у хвильовому вигляді, на межах кадру знижується інтенсивність сигналу.

В даній дисертаційній роботі проблема «поганих» відліків була вирішена для обох постдетекторного та когерентного алгоритмів, що дозволило прискорити час обробки майже вдвічі порівняно з існуючими методами. «Погані» відліки сусідніх кадрів обробки склалися між собою. В попередньому методі необхідно було зсувати кадр обробки циклічно на кількість «поганих» відліків, що змушувало обробляти майже весь масив даних двічі. В новому методі частини кадрів із «поганими» відліками не втрачаються, а переносяться на наступний кадр. При цьому майже не потребується додаткових ресурсів операційної пам'яті, бо кожен кадр проходить обробку тільки один раз. Такий прискорений метод дозволяє робити швидкі конвеєрні програми обробки даних радіоастрономічних спостережень, та може бути застосований у широкому спектрі задач.

Класичним підходом для пошуку та аналізу тонкої структури є кореляційний аналіз. На кореляційній функції інтенсивності  $R(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int I(t) I^*(t + \tau) dt$ , де  $I^*$  — це комплексне спряження, а  $\tau$  — це величина зсуву, наявні когерентні процеси у випромінюванні (які є, по суті, тонкою структурою) проявляються у вигляді характерних зламів на відстанях, що дорівнюють масштабам когерентності. В залежності від задачі вивчають середні АКФ імпульсів та АКФ індивідуальних імпульсів. В даній роботі були запропоновані оригінальні методи підвищення

контрасту тонких деталей, які містяться в кореляційних функціях індивідуальних імпульсів. Зі зниженням інтенсивності широких субімпульсних компонент, тонкі компоненти проявляються чіткіше. Це робиться за рахунок фільтрації та віднімання двох кореляційних функцій різних масштабів.

Інший шлях підвищення контрасту тонких деталей, які містяться у радіовипромінюванні пульсара, є деконволюція (зворотня до згортки операція) імпульсу з модельною імпульсною характеристикою середовища поширення. На приймальній стороні огинаюча імпульсу  $s_{obs}(\tau)$  є результатом згортки огинаючої імпульсу, який був випромінений магнітосферою пульсара  $s_{rad}(t)$  та імпульсної характеристики середовища поширення  $h(t)$ :

$$s_{obs}(\tau) = s_{rad}(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s_{rad}(t) \cdot h(\tau - t) dt.$$

В даній роботі базуючись на моделі тонкого фазового екрану, який описує середовище розсіяння, була проведена деконволюція АП пульсара J0814+7429.

**Третій розділ** присвячено аналізу даних спостережень декаметрового радіовипромінювання пульсарів J0243+6257, J0814+7429 та J0953+0755 з високою часовою роздільною здатністю. Спостереження проводились на декаметровому радіотелескопі УТР-2. Мета аналізу — це пошук тонкої структури радіовипромінювання цих пульсарів, оцінка її параметрів та дослідження впливу ефектів середовища поширення на параметри тонкої структури.

Дослідження АП пульсара **J0243+6257** проводились вперше у широкому діапазоні частот. Метою досліджень були оцінки точного значення МД у декаметровому діапазоні, оцінка сталої часу розсіяння, яка наразі є єдиною для даного пульсара, та виявлення тонкої структури радіовипромінювання. Точна МД становила  $DM = 3.8214 \pm 0.0001$  пк·см<sup>-3</sup>. До сигналу пульсара був застосований цифровий смуговий фільтр 18 — 30 МГц, який потім був розбитий на 4 додаткові смуги з шириною по 3 МГц кожна на центральних частотах  $f = 19.5, 22.5, 25.5$  та 28.5 МГц. Саме таку частотну смугу було обрано з урахуванням особливостей спостереження пульсарів у декаметровому діапазоні та параметрів радіотелескопу УТР-2. Під час спостережень було зареєстровано шість АП, що мали мінімальне співвідношення  $S/N > 5$  у максимумі хоча б в одній з чотирьох смуг. Основні результати були отримані для даних з часовою та частотною роздільними здатностями  $\delta t = 0.25$  мс та  $\delta f = 8$  кГц. Зафіксовані АП є широкосмуговими у межах смуги спостереження. Вони виникають на тлі субімпульсної компоненти. Приклад інтенсивного АП показаний на рисунку 1.

Характерний час розсіяння  $\tau_{sc}(f)$  пульсара J0243+6257 визначався у чотирьох смугах за шириною його АП, шириною АКФ інтенсивності імпульсів та методом мінімізації середньоквадратичних відхилень між модельною функцією та реальним сигналом на часовому інтервалі  $\sim 3\tau_{sc}(f)$ . В якості моделі обрано експонентну функцію виду  $\exp(-t / \tau_{sc}(f))$ .

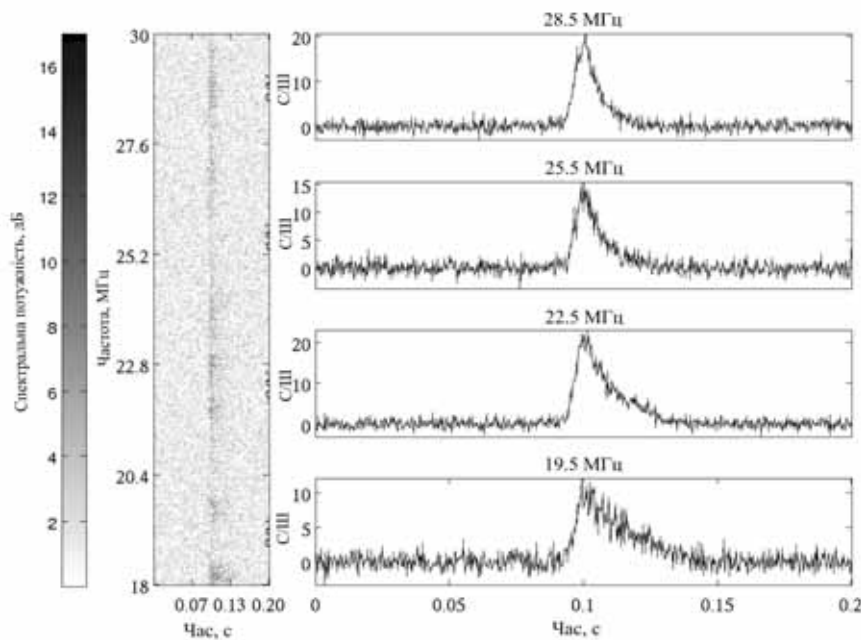


Рис. 1. АП пульсара J0243+6257. Ліворуч: динамічний спектр АП у діапазоні 18 — 30 МГц. Праворуч: 4 проінтегровані профілі АП на частотах 19.5, 22.5, 25.5 та 28.5 МГц. Роздільні здатності динамічного спектру:  $\delta t = 0.25$  мс,  $\delta f = 8$  кГц.

В зареєстрованих сигналах пульсара J0243+6257 зустрічається сильне та слабе розсіяння. АКФ профілів АП розділяються на групи імпульсів з «короткою» та «довгою» шкалами когерентності випромінювання (див. рис. 2).

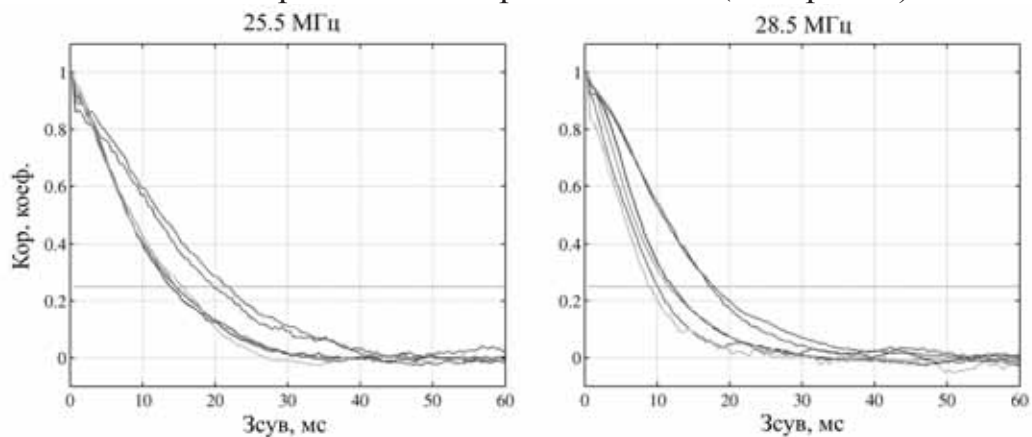


Рис. 2. АКФ АП пульсара J0243+6257 на частотах 25.5 МГц та 28.5 МГц. АКФ розділяються на дві групи, які відповідають АП з «короткою» та «довгою» шкалою випромінювання. Роздільні здатності:  $\delta t = 0.5$  мс,  $\delta f = 3$  МГц. Пунктиром вказано рівень 0.25 коефіцієнту кореляції від максимуму АКФ.

Результати обробки спостереження пульсара **J0814+7429** показали, що в його декаметровому радіовипромінюванні існує два масштаби когерентності. Також була виявлена тонка структура його радіовипромінювання (див. рис. 3). Раніше подібна структура була знайдена на частоті 25 МГц без вказівок на те, що вона випромінюється всередині АП. Сигнал даного пульсара був проаналізований у

чотирьох спектральних смугах по 3 МГц завширшки на частотах 19.5, 22.5, 25.5 та 28.5 МГц (див. рис. 4).

Зі всієї серії спостережень було обрано дев'ять АП пульсара J0814+7429 з мінімальним співвідношенням С/Ш у максимумі  $> 5$  (хоча б в одній з чотирьох смуг) та з мінімальним впливом радіозавад. Дев'ять АП поділились на дві групи за шириною профілю: імпульси з «короткою»  $\tau_{sh}$  та «довгою»  $\tau_{lng}$  часовою шкалою.

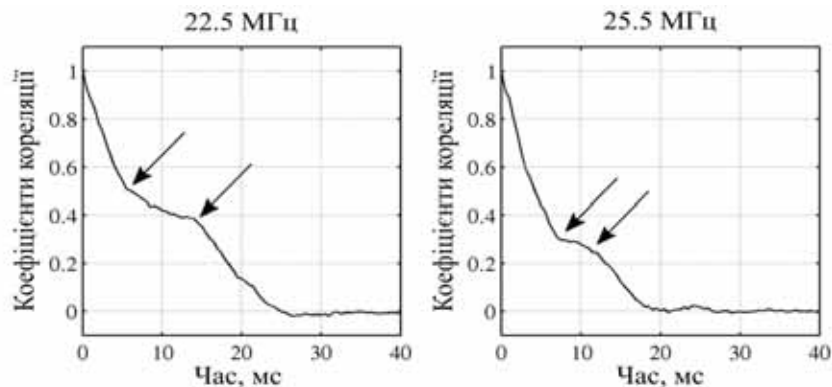


Рис. 3. АКФ профілю АП пульсара J0814+7429 на частотах 22.5 та 25.5 МГц. Стрілками вказані злами на АКФ, які відповідають зареєстрованій тонкій структурі. Характерний час кореляції дорівнює  $\tau_{sh} = 5$  мс на 22.5 МГц та  $\tau_{sh} = 7$  мс на 25.5 МГц. Другий злам на АКФ характеризує «довгу» часову шкалу тонкої структури АП. Він відповідає  $\tau_{lng} = 14$  мс на 22.5 МГц та  $\tau_{lng} = 11.5$  мс на 25.5 МГц. Третя гілка відповідає повній ширині АП. Часова роздільна здатність:  $\delta t = 0.5$  мс.

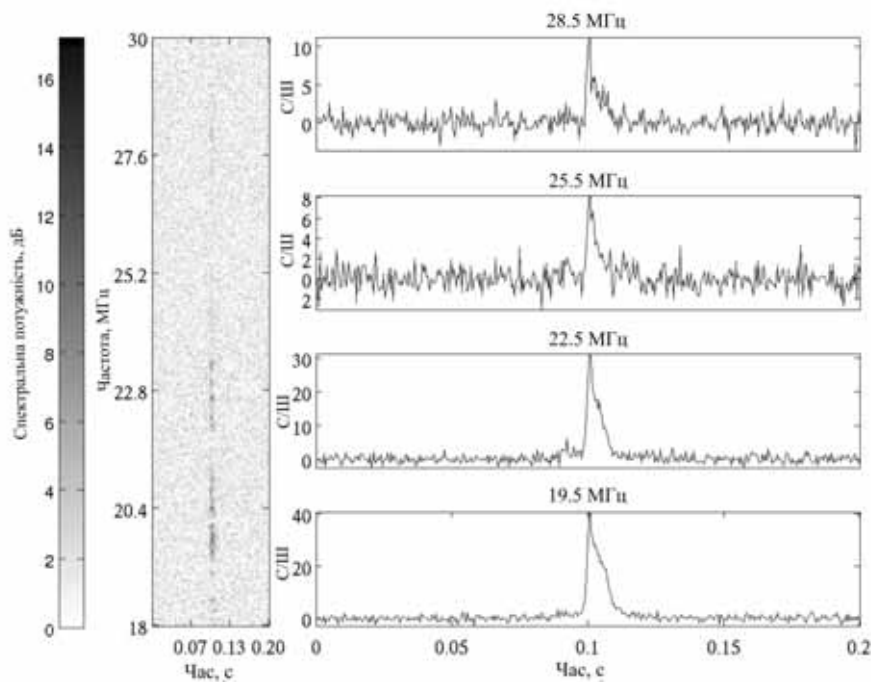


Рис. 4. АП пульсара J0814+7429 з «довгою»  $\tau_{lng}$  шкалою випромінювання. Ліворуч: динамічний спектр АП у діапазоні 18 — 30 МГц; праворуч: 4 проінтегровані профілі АП на частотах 19.5, 22.5, 25.5 та 28.5 МГц. Роздільні здатності динамічного спектру:  $\delta t = 0.5$  мс,  $\delta f = 8$  кГц.

Характерні масштаби «короткої» та «довгої» шкали АП були оцінені на частотах 22.5 та 25.5 МГц, оскільки саме в цих спектральних смугах досягається максимальне співвідношення С/Ш. «Коротка» шкала  $\tau_{sh}$  склала 9.7 та 7 мс, а «довга»  $\tau_{lng}$  — 13 та 13.44 мс на обраних частотах.

До найінтенсивніших АП пульсара J0814+7429 була застосована деконволюція сигналу з імпульсною характеристикою середовища розсіяння в рамках моделі тонкого фазового екрану. Найінтенсивніші імпульси розпалися на серію більш коротких імпульсів, які мають ширину  $\sim \tau_{sc}(f)$ . Такий ефект може свідчити про те, що у магнітосфері пульсара випромінюється серія коротких імпульсів, які проходячи крізь міжзоряне середовище замиваються. Як правило, подібні вузькі імпульси випромінюються короткими серіями, або випромінюються на початку плато. З обраними параметрами часової та частотної роздільних здатностей, та обмеженнями у чутливості радіотелескопу, ми не в змозі розділити «довгу» імпульсну компоненту. Однак не виключено, що вона так само складається з серії коротких, але менш інтенсивних імпульсів.

Під час спостережень пульсара **J0953+0755** у спектральній смузі 18 — 30 МГц була зафіксована серія АП, з якої один імпульс мав рекордне співвідношення С/Ш = 20. Для цього імпульсу провели оцінки точного значення МД та характерного масштабу тонкої структури.

На динамічному спектрі з високою часовою роздільною здатністю 62 мкс можливо побачити, що цей АП складається з 4 компонент (див. рис. 5). Компоненти розпадаються на парні та непарні. Непарні компоненти розташовані у смузі частот 18 — 26 МГц, а парні — у 23 — 28 МГц. Різним парам компонент імпульсу відповідають різні значення видимої МД. Точне значення МД непарних компонент складає  $DM_{odd} = 2.9720 \pm 1.2 \cdot 10^{-4}$  пк·см<sup>-3</sup>, а парних компонент —  $DM_{even} = 2.9730 \pm 1.2 \cdot 10^{-4}$  пк·см<sup>-3</sup>.

Різниця між середніми значеннями МД двох пар компонент складає  $\Delta DM = 0.001 \pm 1.2 \cdot 10^{-4}$  пк·см<sup>-3</sup>. Вона перевершує аналогічні значення, які виникають у міжпланетному середовищі ( $DM_{IPM} \sim 4 \cdot 10^{-5} \pm 1 \cdot 10^{-5}$  пк·см<sup>-3</sup>) та в іоносфері Землі ( $DM_{Earth} \sim 10^{-6}$  пк·см<sup>-3</sup>). Величина  $\Delta DM$  на кілька порядків вища, ніж зазначені параметри  $DM_{IPM}$  та  $DM_{Earth}$ . Тому, отримана величина є не тільки значущою, але й дозволяє вважати, що ми спостерігаємо різницю в дисперсійній затримці, що виникає всередині магнітосфери пульсара. Якщо компоненти випромінюються в різних областях магнітосфери пульсара з проміжком часу  $\Delta\tau = 6.25$  мс (це відстань між сусідніми компонентами на динамічному спектрі імпульсу, рис. 5, верхні панелі), то груба оцінка максимальної радіальної різниці між областями випромінювання складає  $\Delta l \leq c \Delta\tau = 1875$  км.

Окремо у кожній парі компонент була виявлена тонка структура з декількома масштабами кореляції. Найкоротша структура має час кореляції  $\tau_{sh} = 1$  мс (вказана стрілками на АКФ на рис. 6). Масштаби 3.5 мс та 4 мс відповідають інтервалам двогорбого вікна, яке було застосовано для відокремлення компонент.

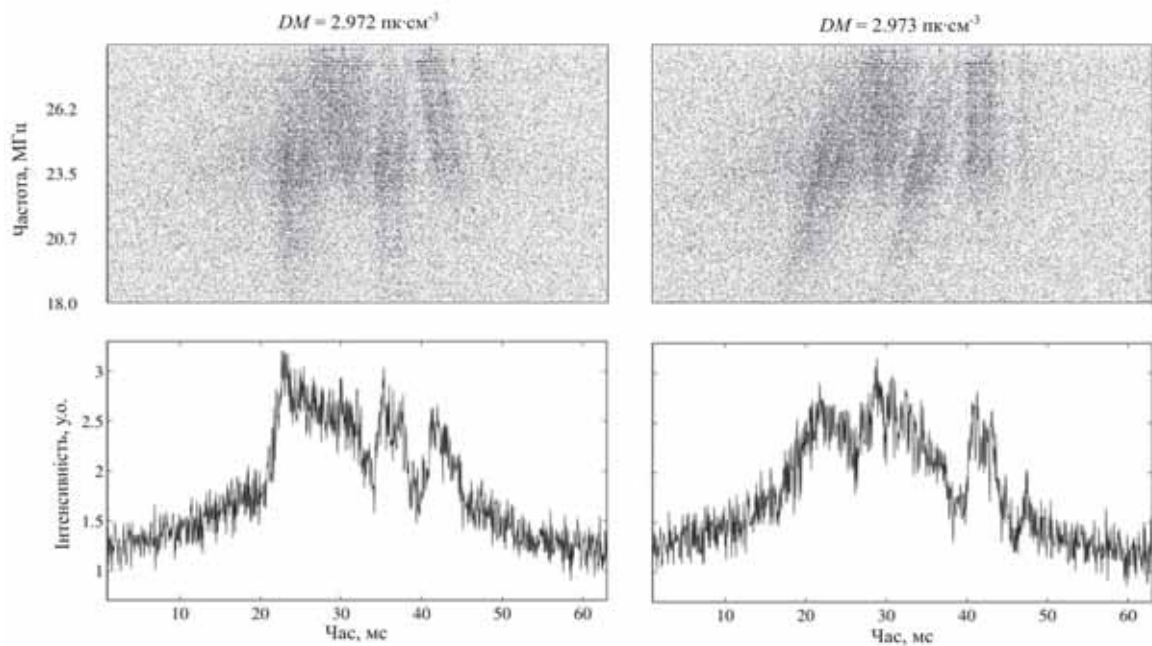


Рис. 5. АП пульсара J0953+0755 з різними за значенням МД. Верхні панелі: динамічний спектр у смузі частот 18 — 28 МГц. Роздільні здатності динамічного спектру:  $\delta t = 62$  мкс,  $\delta f = 32$  кГц. Нижні панелі: проінтегрований у повній смузі частот профіль імпульсу. Ліві панелі: непарні компоненти з  $DM_{odd} = 2.9720$  пк·см<sup>-3</sup>. Праві панелі: парні компоненти з  $DM_{even} = 2.9730$  пк·см<sup>-3</sup>.

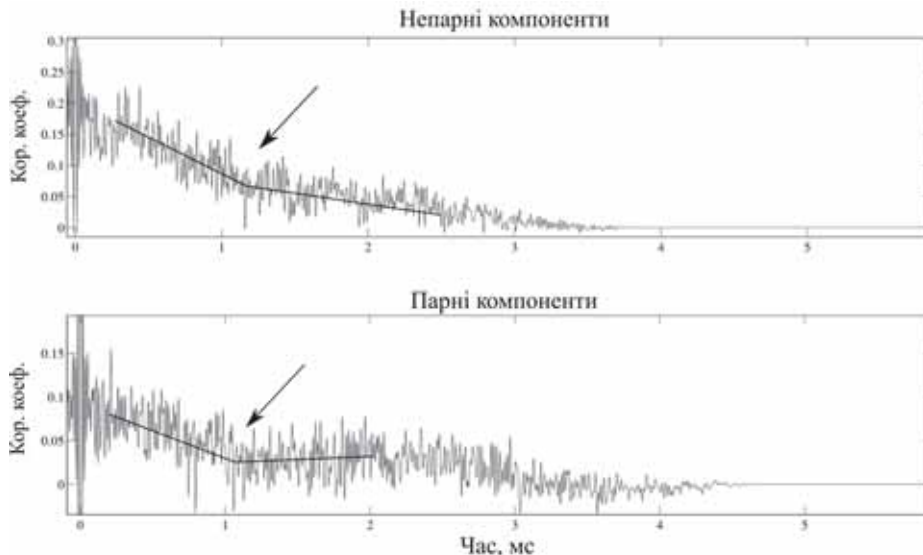


Рис. 6. АКФ профілів двох пар компонент АП пульсара J0953+0755. Верхня панель: непарні компоненти з  $DM_{odd} = 2.9720$  пк·см<sup>-3</sup>; нижня панель: парні компоненти з  $DM_{even} = 2.9730$  пк·см<sup>-3</sup>. Пари компонент відокремлені одна від одної, в кожній парі підвищена контрастність. Часова роздільна здатність:  $\delta t = 4$  мкс.

Час кореляції  $\tau_{sh}$  відповідає частотному спектру  $\sim 1$  кГц. Водночас, характерний спектр мерехтінь на неоднорідностях електронної концентрації у міжпланетному середовищі складає  $\sim 1$  Гц, а в іоносфері Землі —  $\sim 0.1$  Гц. Це, швидше за все, означає, що найкоротший масштаб тонкої структури 1 мс формується у межах



плазми у магнітосфері пульсара або у межах пульсарного вітру. Параметр  $\tau_{sh}$  дозволяє оцінити Лоренц-фактор  $\gamma$  заряджених частинок, що випромінюють в даному діапазоні:  $\gamma = (1 - v^2 / c^2)^{-1/2} = P_0 / \tau_{sh} \approx 253$ .

## ВИСНОВКИ

У результаті проведених комплексних досліджень досягнуто головну мету роботи — отримано радіальне та довготне розділення магнітосфери пульсара за допомогою таких параметрів випромінювання, як міра дисперсії та характерний час когерентності тонкої структури. Показано, яким чином розсіяння лімітує нижній масштаб тонкої структури, який можливо спостерігати на певній частоті.

Головними оригінальними результатами роботи є наступні:

1. Вперше в широкому діапазоні частот знайдено ефект швидкої зміни міри дисперсії на ультракоротких інтервалах часу 5 — 6 мс в межах індивідуального імпульсу пульсара. Цей ефект спостерігається в аномально інтенсивному імпульсі пульсара J0953+0755. Такий стрибок міри дисперсії має відбуватись в самій магнітосфері пульсара чи в межах пульсарного вітру. Це дозволяє розділити магнітосферу пульсара вздовж променя зору.

2. Вперше у пульсара J0953+0755 виявлено тонку структуру радіовипромінювання з характерним часом когерентності 1 мс у декаметровому діапазоні. Це дозволило оцінити лінійні розміри ділянки випромінювання в магнітосфері та розділити магнітосферу цього пульсара за довготою. Також оцінено Лоренц-фактор зарядів, які є джерелом генерації тонкої структури.

3. Вперше у пульсара J0243+6257 зареєстровано та проведено аналіз індивідуальних аномально інтенсивних імпульсів. Дано оцінку сталої часу розсіяння радіовипромінювання пульсара J0243+6257 у декаметровому діапазоні, яка наразі є першою та єдиною в широкому діапазоні частот. Виявлено, що у декаметровому діапазоні в його радіовипромінюванні присутні два масштаби когерентності. Показано, що розсіяння сигналу від цього пульсара на просторових флуктуаціях електронної концентрації середовища поширення не дозволяє спостерігати тонку структуру в даному частотному діапазоні.

4. Вперше у пульсара J0814+7429 зафіксовано два масштаби когерентності радіовипромінювання. Вірогідно, вони пов'язані з морфологією тонких компонент, з яких складаються індивідуальні імпульси. За допомогою методів деконволюції вдалось усунути вплив розсіяння на найінтенсивніші імпульси цього пульсара в рамках моделі тонкого фазового екрану. Показано, що широкі компоненти таких імпульсів складаються із серії більш коротких компонент з шириною 2 — 3 мс. У даного пульсара зафіксована тонка структура радіовипромінювання, за допомогою якої дано оцінку лінійного розміру ділянки випромінювання в його магнітосфері.

5. Запропоновано та втілено оригінальні методи обробки декаметрового радіовипромінювання пульсарів, які мінімізують вплив середовища поширення сигналу та дозволяють проводити дослідження тонкої структури радіовипромінювання з високою ефективністю. До них відносяться прискорені

методи постдетекторного та когерентного усунення дисперсійної затримки, які дозволяють робити обробку сигналу майже вдвічі швидше. Також до них відносяться методи підвищення контрасту кореляційних функцій інтенсивності імпульсу, які виявляють наявні характерні масштаби тонкої структури радіовипромінювання.

Загалом отримані результати підтверджують необхідність проведення досліджень тонкої структури радіовипромінювання пульсарів у декаметровому діапазоні та показують переваги низькочастотного діапазону для спостереження тонких проявів ефектів поширення. Але це стосується тільки тих близьких до Землі пульсарів, які випромінюють аномально інтенсивні імпульси, а значення міри дисперсії та міри розсіяння у напрямку на ці пульсари є відносно малими.

### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Ulyanov O. M., Investigation of the Earth ionosphere using the radio emission of pulsars / O. M. Ulyanov, A. I. Shevtsova, D. V. Mukha, A. A. Seredkina // *Baltic Astronomy*. – 2013. – Vol. 22. – P. 53 – 65.

Автор розробляла математичну модель імпульсного радіовипромінювання пульсарів та модель середовища для побудови методів зондування іоносфери Землі.

2. Vasylieva I. Y., Data Processing Pipeline for Decameter Pulsar/Transient Survey / I. Y. Vasylieva, V. V. Zakharenko, P. Zarka, O. M. Ulyanov, A. I. Shevtsova, A. A. Seredkina // *Odessa Astronomical Publications*. – 2013. – Vol. 26. – P. 159.

Автор проводила спостереження пульсарів на декаметровому радіотелескопі УТР-2 у спектральному, кореляційному та хвильовому режимах. Також брала участь в обговоренні отриманих результатів та підготовці тексту до публікації.

3. Ульянов О.М., Поляризаационное зондирование магнитосферы пульсаров / О. М. Ульянов, А. И. Шевцова, А. А. Скорик // *Известия Крымской астрофизической обсерватории*. – 2013. – Т. 109, – No. 4. – С. 159 – 168.

Автор проводила спостереження аномально інтенсивних імпульсів пульсарів В0809+74 та В0950+08 на радіотелескопі УТР-2, та проводила обробку спостережень. Також автор разом із колегами обговорювала фізичну інтерпретацію результатів.

4. Ульянов О. М., Алгоритмы определения поляризационных параметров радиоизлучения пульсаров / О. М. Ульянов, А. И. Шевцова, А. А. Скорик // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2014. – Т. 19, – No. 2. – С. 101 – 110.

Автор брала участь в обговоренні моделі магнітосфери пульсарів та параметрів середовища поширення, а також проводила модельні розрахунки. Автор спільно із колегами готувала статтю до публікації.

5. Vasylieva I. Y., Decameter pulsar/transient survey of northern sky. First results / I. Y. Vasylieva, V. V. Zakharenko, A. A. Konovalenko, P. Zarka, O. M. Ulyanov, A. I. Shevtsova, A. O. Skoryk // *Radio physics and Radio astronomy*. – 2014. – Vol. 19, – No. 3. – P. 197.

Автор проводила частину оглядового спостереження пульсарів та транзйентних радіосигналів на радіотелескопі УТР-2, а також брала участь в обговоренні результатів.

6. Ulyanov O. M., Detection of the fine structure of the pulsar J0953+0755 radio emission in the decametre wave range / O. M. Ulyanov, A. O. Skoryk, A. I. Shevtsova, M. S. Plakhov, O. O. Ulyanova // MNRAS.– Jan. 2016.– Vol. 455.– Pp. 150 – 157.

Автор проводила спостереження пульсара B0950+08 у хвильовому режимі на радіотелескопі УТР-2, була одним із розробників методів пошуку тонкої структури декаметрового радіовипромінювання пульсарів та проводила обробку даних спостережень та аналіз зареєстрованих аномально інтенсивних імпульсів. Автор проводила аналіз стрибка міри дисперсії та разом із колегами обговорювала його фізичну інтерпретацію. Також автор готувала текст статті до публікації.

7. Konovalenko A., The modern radio astronomy network in Ukraine: UTR-2, URAN and GURT / Konovalenko A., Sodin L., Zakharenko V., Zarka P., Ulyanov O., Sidorchuk M., Stepkin S., Tokarsky P., Melnik V., Kalinichenko N., Stanislavsky A., Koliadin V., Shepelev V., Dorovsky V., Ryabov V., Koval A., Bubnov I., Yerin S., Gridin A., Kulishenko V., Reznichenko A., Bortsov V., Lisachenko V., Reznik A., Kvasov G., Mukha D., Litvinenko G., Khristenko A., Shevchenko V. V., Shevchenko V. A., Belov A., Rudavin E., Vasylieva I., Miroshnichenko A., Vasilenko N., Olyak M., Mylostna K., Skoryk A., Shevtsova A., Plakhov M., Kravtsov I., Volvach Y., Lytvinenko O., Shevchuk N., Zhouk I., Bovkun V., Antonov A., Vavriv D., Vinogradov V., Kozhin R., Kravtsov A., Bulakh E., Kuzin A., Vasilyev A., Brazhenko A., Vashchishin R., Pylaev O., Koshovyy V., Lozinsky A., Ivantyshin O., Rucker H. O., Panchenko M., Fischer G., Lecacheux A., Denis L., Coffre A., Griebmeier J.-M., Tagger M., Girard J., Charrier D., Briand C., Mann G. // Experimental Astronomy.– Aug. 2016.– Vol. 42.– Pp. 11 – 48.

Автор проводила аналіз аномально інтенсивних імпульсів пульсарів J0243+6257 та J0953+0755 та робила оцінку точної міри дисперсії для цих імпульсів у декаметровому діапазоні.

8. Kravtsov I. P., Parameters of the Transient Signals Detected in the Decameter Survey of the Northern Sky / I. P. Kravtsov, V.V. Zakharenko, I.Y. Vasylieva, S. Mykhailova, O. Ulyanov, A. Shevtsova, A. Skoryk // Odessa Astronomical Publications. - 2016. – Vol. 29. – P. 179.

Автор проводила частину оглядових спостережень пульсарів та транзйентних радіосигналів на радіотелескопі УТР-2 та брала участь в обговоренні та підготовці остаточної редакції статті.

9. Коноваленко А. А., Астрофизические исследования с помощью малоразмерных низкочастотных радиотелескопов нового поколения / Коноваленко А. А., Ерин С. Н., Бубнов И. Н., Токарский П. Л., Захаренко В. В., Ульянов О. М., Сидорчук М. А., Степкин С. В., Гридин А. А., Квасов Г. В., Колядин В. Л., Мельник В. Н., Доровский В. В., Калиниченко Н. Н., Литвиненко Г. В., Зарка Ф., Дени Л., Жирар Ж., Руцер Х. О., Панченко М., Станиславский А. А., Христенко А. Д., Муха Д. В., Резниченко А. М., Лисаченко В. М., Борцов В. В., Браженко А. И., Васильева

Я. Ю., Скорик А. А., Шевцова А.И., Милостная К. Ю. // Радиофизика и радиоастрономия.– 2016.– Т. 21.– No. 2.– С. 83 – 131.

Автор брала участь в обговоренні можливості використання антенної решітки ГУРТ для спостереження імпульсів пульсарів й оцінки міри дисперсії у довготривалих відрізках часу.

**10.** Zakharenko V., Digital Receivers for Low-Frequency Radio Telescopes UTR-2, URAN, GURT / Zakharenko V., Konovalenko A., Zarka P., Ulyanov O., Sidorchuk M., Stepkin S., Koliadin V., Kalinichenko N., Stanislavsky A., Dorovskyy V., Shepelev V., Bubnov I., Yerin S., Melnik V., Koval A., Shevchuk N., Vasylieva I., Mylostna K., Shevtsova A., Skoryk A., Kravtsov I., Volvach Y., Plakhov M., Vasilenko N., Vasylykivskiy Y., Vavriv D., Vinogradov V., Kozhin R., Kravtsov A., Bulakh E., Kuzin A., Vasilyev A., Ryabov V., Reznichenko A., Bortsov V., Lisachenko V., Kvasov G., Mukha D., Litvinenko G., Brazhenko A., Vashchishin R., Pylaev O., Koshovyy V., Lozinsky A., Ivantyshyn O., Rucker H. O., Panchenko M., Fischer G., Lecacheux A., Denis L. Coffre A., Griebmeier J.-M. // Journal of Astronomical Instrumentation.– Mar. 2016.– Vol. 5.– Pp. 1641010 – 738.

Автор брала участь в обговоренні можливості використання фазованих решіток УТР-2 та ГУРТ для одночасного спостереження пульсарів у широкосмуговому режимі, спираючись на результати попередніх спостережень та обробці даних пульсарів, які були отримані на радіотелескопі УТР-2.

**11.** Скорик А. А., Тонкая структура аномально интенсивных импульсов пульсара J0814+7429 у декаметровом диапазоне / А. А. Скорик, О. М. Ульянов, В. В. Захаренко, А. И. Шевцова, Я. Ю. Васильева, М. С. Плахов, И. П. Кравцов // Радиофизика и радиоастрономия.– 2017.– Т. 22.– No. 2.– С. 93 — С. 111.

Автор проводила спостереження та аналіз даних пульсара J0814+7429 спрямовані на пошук тонкої структури його радіовипромінювання. Автор розробляла методи оцінки ширини імпульсів, оцінки точного значення міри дисперсії та методів підвищення контрасту для пошуку тонкої структури. Також автор брала участь в обговоренні результатів, їх фізичній інтерпретації та готувала текст публікації.

**12.** Ульянов О. М. Моделирование эффектов распространения импульсного излучения пульсаров / О. М. Ульянов, А. А. Середкина, А. И. Шевцова // Электромагнитные методы исследования окружающего пространства : материалы 11 укр. конф., Харьков, 25 — 27 сентября 2012 г. / Харьков. ХНУ им. В.Н. Каразина. — Харьков : ХНУ им. В.Н. Каразина. 2012. – С. 3.

Автор проводила моделювання імпульсного радіовипромінювання пульсарів, на яке впливає середовище поширення, брала участь в обговоренні отриманих результатів та готувала всі матеріали для стендової доповіді.

**13.** Ulyanov O. M. Origin of the pulsar pulse fine structure / O. M. Ulyanov, А. А. Seredkina, A. I. Shevtsova // IAUS 291: Neutron stars and pulsars: Challenges and opportunities after 80 Years : proceedings of the International Astronomical Union, Nanjing China, 24 August 2012. — Vol. 8, No. S291. — P. 527–529.

Автор проводила моделювання імпульсного радіовипромінювання пульсарів та вплив на них середовища поширення. Автор брала участь у постановці задачі та

обговоренню результатів, а також готувала матеріали для виступу та публікації тексту тез конференції.

**14.** Ulyanov O. Polarization sounding of the pulsar magnetosphere / O. Ulyanov, A. Shevtsova, A. Seredkina // IAUS 291: Neutron stars and pulsars: Challenges and opportunities after 80 Years : proceedings of the International Astronomical Union, Nanjing China, 24 August 2012. – Vol. 8, No. S291. – P. 530 – 532.

Автор брала участь в обговоренні отриманих результатів, та разом із співавторами готувала матеріали для публікації тез конференції.

**15.** Ulyanov O. M. Investigation of the earth ionosphere using the radio emission of pulsars / O. M. Ulyanov, A. I. Shevtsova, D. V. Mukha, A. A. Seredkina // Advances in Radio Astronomy in Near-Earth Environment : proceedings of the Ventspils International Radio Astronomy Conference, 13 – 15 August 2012. – Ventspils, Latvia, 2012. – P. 53 – 65.

Автор розробляла модель імпульсного випромінювання пульсарів під впливом ефектів поширення, брала участь в обговоренні результатів, готувала матеріали для виступу та публікації тез доповіді на конференції.

**16.** Seredkina A. O. The modeling of propagation effects of pulsar pulse radiation / A. O. Seredkina, O. Ulyanov, A. I. Shevtsova // YSF «Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics» : proceedings of the XII Kharkiv Young Scientist Conference, Kharkiv, 4 — 7 December, 2012. — Kharkiv, Ukraine, 2012. — CD-ROM.

Автор проводила моделювання впливу ефектів поширення на імпульсне радіовипромінювання пульсарів, разом із співавторами обговорювала отримані результати, готувала матеріали для доповіді та текст для публікації тез доповіді.

**17.** Ulyanov O. M. The methods of polarization sounding of the pulsar magnetosphere / O. M. Ulyanov, A. A. Shevtsova, A. A. Seredkina // Cosmic magnetic fields : Legacy of A.B. Severny : proceedings of the COSPAR Symposium, Nauchny, 1 — 6 September 2013 : abstract. — Nauchny, Ukraine, 2012. - P. 159 – 168.

Автор брала участь в обговоренні можливості використання імпульсного радіовипромінювання пульсарів для зондування магнітосфер пульсарів, готувала матеріали для доповіді на конференції.

**18.** Skoryk A. O. Detection of a fine structure of the pulsar J0953+0755 decametric radio emission / A. O. Skoryk, O. Ulyanov, A. I. Shevtsova // YERAC : proceedings of the 44th Young European Radio Astronomers Conference, Torun, Poland, 8 — 12 September 2014. — Torun, Poland, 2014. — P. 6.

Автор проводила спостереження та обробку даних пульсара J0953+0755, аналізувала точне значення міри дисперсії та оцінювала характерний час когерентності тонкої структури у цього пульсара. Брала участь в інтерпретації отриманих результатів, готувала матеріали для доповіді та текст для публікації тез конференції.

**19.** Skoryk A. O. Detection of a fine structure of the pulsar J0953+0755 radiation in the low frequency range radio astronomy / A. O. Skoryk, O. Ulyanov, A. I. Shevtsova [et al.] // Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics : proceedings of the 14th

Kharkiv Young Scientist Conference, Kharkiv, 14 — 17 October 2014. — Kharkiv, 2014. — CD-ROM.

Автор проводила спостереження та обробку даних пульсара J0953+0755, аналізувала точне значення міри дисперсії та оцінювала характерний час когерентності тонкої структури у цього пульсара. Брала участь в інтерпретації отриманих результатів, готувала матеріали для доповіді та текст для публікації тез конференції.

**20.** Ulyanov O. M. New technique of testing and calibration of the UTR-2 radio telescope / O. M. Ulyanov, M. A. Sidorchuk, V. V. Zakharenko, S. N. Yerin, I. N. Bubnov, A. A. Skoryk, A. I. Shevtsova, M. S. Plakhov, D. V. Mukha, E. R. Rudavin // *Antenna Theory and Techniques : proceedings of the 10th International Conference*, Kharkiv, 21 — 24 April 2015 — Kharkiv, 2015. — P. 6.

Автор брала участь у роботі з вимірювання передатних характеристик у тракті сигналу радіотелескопу УТР-2, обробляла дані вимірювання. Також брала активну участь в обговоренні моделі калібрування фазованих антенних решіток та отриманих результатів вимірювання.

**21.** Skoryk A. O. Fine structure of the pulsar decameter radiation as the probe of the propagation media / A. O. Skoryk, O. M. Ulyanov, V. V. Zakharenko // *YERAC : proceedings of the 45th Young European Radio Astronomers Conference*, Ventspils, 19 — 21 August 2015. — Ventspils, Latvia, 2015. — P. 86.

Автор проводила спостереження пульсарів та обробку даних спостережень. Разом із співавторами брала участь в обговоренні отриманих результатів, готувала матеріали доповіді.

**22.** Skoryk A. O. Fine structure of the pulsar decameter radiation as the probe of the propagation media / A. O. Skoryk, O. M. Ulyanov, V. V. Zakharenko // *YSF : proceedings of the International Young Scientists Forum on Applied Physics*, Dnipropetrovsk, 29 September – 2 October 2015. — Dnipropetrovsk, 2015. — CD-ROM.

Автор проводила спостереження пульсарів та обробку даних спостережень. Разом із співавторами брала участь в обговоренні отриманих результатів, готувала матеріали доповіді та текст тез конференції.

**23.** Skoryk A. O. Fine structure of the PSR B0809+74 individual pulses in decameter wave range / A. O. Skoryk, O. M. Ulyanov, V. V. Zakharenko, A. I. Shevtsova // *YSF : proceedings of the 2016 International Young Scientists Forum on Applied Physics*, Kharkiv, 14 — 20 August, 2016. — Kharkiv, 2016. — CD-ROM.

Автор проводила спостереження пульсару B0809+74, попередню обробку даних спостережень, пошук тонкої структури радіовипромінювання та аналіз характерних масштабів когерентності в радіовипромінюванні цього пульсара. Автор готувала матеріали доповіді та текст для публікації тез конференції.

**24.** Skoryk A. O. Anomalously intense pulses as a pulsar magnetosphere probes / A. O. Skoryk, O. M. Ulyanov, A. I. Shevtsova. — *YSF : proceedings of the 2017 International Young Scientists Forum on Applied Physics*, Lviv, 17 — 20 October, 2017. — Lviv, 2017. — CD-ROM.

Автор проводила спостереження пульсару B0809+74, проводила попередню обробку даних спостережень та деконволюцію аномально інтенсивних імпульсів. Також автор готувала матеріали доповіді та текст для публікації тез конференції.

**25.** Ulyanov O. M. Rotation measure estimation for anomalously intense pulses of PSR J0243+6257 / O. M. Ulyanov, A. I. Shevtsova, V. V. Zakharenko, A. O. Skoryk, Ia. Y. Vasylieva // *Astronomy and Beyond: Astrophysics, Cosmology and Gravitation, Cosmomicrophysics, Radio-astronomy and Astrobiology : proceedings of the 17-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-school, Odessa, 13 — 20 August 2017.* – Odessa, 2017. – P. 31.

Автор проводила спостереження аномально інтенсивних імпульсів пульсара J0243+6257 та робила попередню обробку даних спостережень, а також брала участь в обговоренні отриманих результатів.

## АНОТАЦІЯ

**Скорик (Середкіна\*) А. О. Тонка структура радіовипромінювання пульсарів у декаметровому діапазоні.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.03.02 – «астрофізика, радіоастрономія». – Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, 2018.

Дисертація присвячена дослідженню параметрів радіовипромінювання найближчих до Землі пульсарів у декаметровому діапазоні. В дисертації запропоновано оригінальний підхід, в якому випромінювання коротких імпульсів пульсарів використовується у якості зондів магнітосфери пульсарів для просторового розділення ділянки випромінювання. Хоча вже досить довгий час імпульсне випромінювання пульсарів використовувалось у якості зондів, але, переважно, у дослідженнях міжзоряного середовища. В даній дисертаційній роботі вперше показано, що для зондування швидкої магнітосферної плазми прийнятні короткі імпульси пульсарів. Вони дозволяють відокремити ефекти поширення, які виникають в різних ділянках середовища. До параметрів радіовипромінювання, що досліджуються у дисертації, та за допомогою яких оцінюються лінійні розміри ділянки випромінювання, відносяться час когерентності тонкої структури, точне значення міри дисперсії та стала часу розсіяння імпульсів.

В дисертації наведені результати обробки даних, які були отримані при спостереженнях пульсарів на декаметровому радіотелескопі УТР-2 у хвильовому режимі з рекордно високою часовою роздільною здатністю. Проаналізовано аномально інтенсивні імпульси пульсарів, які були зафіксовані під час спостережень. Розроблено оригінальні методи усунення впливу середовища поширення, а саме прискорений метод постдетекторної та когерентної компенсації дисперсійної затримки, а також покращені методи пошуку тонкої структури радіовипромінювання пульсарів, які полягають у підвищенні контрасту кореляційних функцій. Ці методи можуть бути застосовані до широкого спектру задач, пов'язаних з імпульсними

*\*Дівоче прізвище*

джерелами випромінювання. Їх можливо використовувати у широкому діапазоні частот, але у декаметровому діапазоні вони дають принципову перевагу.

В дисертації отримано оригінальні результати, які розширюють частотний діапазон вивчення тонкої структури та параметрів розсіяння імпульсів. Показано яким чином розташування пульсара у Галактиці впливає на розсіяння сигналу та обмежує мінімальний часовий масштаб когерентності тонкої структури, який можливо спостерігати. Знайдено унікальний ефект швидкої зміни міри дисперсії на ультракоротких проміжках часу, який можливо спостерігати у найближчих до Землі пульсарів завдяки особливостям декаметрового діапазону спостережень. Завдяки цьому ефекту можливо розділити магнітосферу пульсара радіально вздовж променя зору. Також, з урахуванням конкретних моделей розподілення електрон-позитронної плазми у магнітосфері пульсара, можливо дати кількісні оцінки різниці висоти зон випромінювання у магнітосфері на різних частотах спостережень.

**Ключові слова:** пульсари, аномально інтенсивні імпульси, магнітосфера, ділянка випромінювання, декаметровий діапазон, тонка структура, час когерентності, середовище поширення, міра дисперсії, стала часу розсіяння.

## ABSTRACT

**Skoryk (Seredkina\*) A. O. Fine structure of pulsar radiation in the decameter wave range.** – Qualifying scientific work, the manuscript.

Thesis for the Candidate of Science degree in Physics and Mathematics, specialization 01.03.02 – «Astrophysics, radio astronomy». – Institute of Radio astronomy of NAS of Ukraine, V. N. Karazin Kharkiv National University, the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2018.

The thesis is dedicated to the study of radio emission parameters of the closest to Earth pulsars in the decameter wave range. In the thesis a novel approach is suggested which uses short pulsar pulses as magnetosphere probes to spatially resolve the radiation region. Though the pulse radiation is broadly used as probes, but more frequently for interstellar medium studying. In this work it is shown that to probe fast fluctuations of pulsar plasma only short pulses are required. They allow to separate propagation effects that appear in different parts of the propagation medium. The parameters of pulsar radiation under consideration in the thesis that are used for pulsar magnetosphere resolving include the coherence time of fine structure, the precise dispersion measure parameter and the precise scattering time constant.

In the thesis results of processing of observational pulsar data obtained with UTR-2 decameter radio telescope in wave form registration mode with extremely high time resolution are given. The anomalously intense pulses of pulsars J0243+6257, J0814+7429 and J0953+0755 are analyzed. The novel methods of propagation effects removal are given, namely accelerated method of dispersion delay compensation for both coherent and

\*Maiden name



postdetection algorithms and advanced methods of fine structure search that are based on increasing of contrast of intensity correlation functions. These methods can be applied to a broad variety of radio astronomy problems related to pulsed radiation sources. They can be used in a wide frequency range and in decameter wave range they give significant advantages.

Results obtained in the thesis are novel and expand frequency bounds of research of the fine structure and the scattering parameters of pulsar radiation. It is shown how pulsar location in the Milky Way affects the pulse scattering and limits minimal possible scale of observable fine structure. The unique effect of fast dispersion measure change in ultra short times inside individual pulse is discovered. This effect can be observed for closest to Earth pulsars in decameter wave range due to its distinctive features. The fast dispersion measure variation gives opportunity to resolve a pulsar magnetosphere in depth and estimate height of emission region from the neutron star surface. Also characteristic scales of pulsars radiation fine structure are obtained, which are used for estimation of linear sizes of the radiation zones, in this way pulsar magnetospheres are resolved in longitude.

**Key words:** pulsars, anomalously intense pulses, magnetosphere, radiation region, decameter wave range, fine structure, coherence scale, propagation medium, dispersion measure, scattering time constant.

## АНОТАЦИЯ

**Скорик (Середкина) А. А. Тонкая структура радиоизлучения пульсаров в декаметровом диапазоне.** – Рукопись.

Диссертация на получение научной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 – «астрофизика, радиоастрономия». – Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, Харьков, 2018.

Диссертация посвящена исследованиям параметров радиоизлучения ближайших к Земле пульсаров у декаметровом диапазоне. В диссертации предложен оригинальный подход, в котором излучение коротких импульсов пульсаров используется в качестве зондов магнитосферы пульсаров для пространственного разрешения области излучения. Уже достаточно долгое время импульсное излучение пульсаров используется в качестве зондов, однако, преимущественно, в исследованиях межзвездной среды. В данной диссертационной работе впервые показано, что для зондирования быстрой магнитосферной плазмы подходят короткие импульсы. Они позволяют отделить эффекты распространения, которые возникают в разных участках среды на луче зрения. К параметрам радиоизлучения, которые исследуются в диссертации, и с помощью которых оцениваются линейные размеры области излучения, относятся время когерентности тонкой структуры, точное значение меры дисперсии и постоянная времени рассеивания импульсов.

В диссертации представлены результаты обработки данных, который были

*\*Девичья фамилия*

получены при наблюдениях пульсаров на декаметровом радиотелескопе УТР-2 в волновом режиме с рекордно высоким временным разрешением. Проанализированы аномально интенсивные импульсы пульсаров, которые были зафиксированы во время наблюдений. Разработаны оригинальные методы уменьшения влияния среды распространения, а именно ускоренный метод постдетекторной и когерентной компенсации дисперсионной задержки, а также улучшенные методы поиска тонкой структуры радиоизлучения пульсаров, которые заключаются в повышении контраста корреляционных функций. Эти методы могут быть применены к широкому спектру задач, связанных с импульсными источниками излучения. Их возможно использовать в широком диапазоне частот, но у декаметровом диапазоне они дают принципиальное преимущество.

В диссертации получены оригинальные результаты, которые расширяют частотный диапазон изучения тонкой структуры и параметров рассеивания импульсов. Показано, каким образом расположение пульсара в Галактике влияет на рассеивание сигнала и ограничивает минимальный для наблюдений временной масштаб когерентности тонкой структуры. Найден уникальный эффект быстрого изменения меры дисперсии на ультракоротких промежутках времени, который можно наблюдать у ближайших к Земле пульсаров благодаря особенностям декаметрового диапазона. Благодаря этому эффекту возможно разрешить магнитосферу пульсара в глубину. Также, используя конкретную модель распределения электрон-позитронной плазмы в магнитосфере пульсара, можно дать количественные оценки разности высоты зон излучения в магнитосфере на разных частотах наблюдений.

**Ключевые слова:** пульсары, аномально интенсивные импульсы, магнитосфера, область излучения, декаметровый диапазон, тонкая структура, время когерентности, среда распространения, мера дисперсии, постоянная времени рассеяния.