

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

КРАВЦОВ ІГОР ПЕТРОВИЧ

УДК 523.4-77

ОГЛЯД ПІВНІЧНОГО НЕБА З МЕТОЮ ПОШУКУ ДЖЕРЕЛ
СПОРАДИЧНОГО РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ ДЕКАМЕТРОВИХ ХВИЛЬ

01.03.02 – астрофізика, радіоастрономія

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата фізико-математичних наук

Харків – 2018

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Дослідження швидких, вибухових процесів перетворення матерії й енергії, коротких – а отже, таких, що відбуваються в компактних областях простору з високим енерговиділенням, привертає все більшу увагу дослідників у всіх діапазонах довжин хвиль. В декаметровому діапазоні імпульсні сигнали можуть бути пов'язані зі значно більшою кількістю доступних для спостереження нейтронних зір, ніж на високих частотах, завдяки відомому ефекту розширення конусу випромінювання (зі зниженням частоти) таких джерел, як пульсари, радіотранзїєнти, що обертаються та деяких інших.

Саме тому пошук одиночних імпульсів різних типів нейтронних зір, а також транзїєнтних сигналів іншої природи є актуальним напрямом астрономічних досліджень. І основною, першою задачею для успішного здійснення подібних досліджень, є проведення оглядів неба з метою пошуку таких сигналів.

Дуже важливо підкреслити, що майже всі огляди, що мали на меті пошук пульсарів, були спрямовані на дослідження низьких галактичних широт. Наприклад, досліджуваний діапазон від -10° до $+10^\circ$ галактичної широти або різний час запису для різних широт і т.д. Вибір саме таких областей Галактики для пошуку нейтронних зір пов'язаний із тим, що ці об'єкти, згідно з каталогом ATNF, концентруються близько до диску Галактики, біля $b = 0$. Проте на низьких частотах швидкий ріст розсіяння ($\sim f^{-4}$) обмежує область Галактики, яка доступна для спостережень імпульсів пульсарів, відстанню приблизно 2 кпк, при цьому не буде спостерігатись помітна концентрація джерел до низьких галактичних широт.

Нещодавно вперше на частотах нижче 30 МГц на радіотелескопі УТР-2, у якого незадовго до того була модернізована приймальна апаратура, було виявлене випромінювання 40 відомих пульсарів із 74, що мають $DM < 30$ пк/см³. В даний час ці 40 пульсарів є найбільш повним набором таких об'єктів, у яких було продетектоване декаметрове випромінювання на декаметрових хвилях. Це можливо було зробити виключно на УТР-2 не лише завдяки проведеній модернізації, але й завдяки дуже великій ефективній площі, що забезпечила необхідний рівень чутливості для детектування вищезгаданих пульсарів.

Таким чином, унікальні характеристики УТР-2, такі як широкосмуговість, стійкість до завад і гігантська ефективна площа (а отже, й чутливість) дають можливість провести перший у світі огляд всього Північного неба з метою пошуку спорадичних сигналів різноманітної природи (далі – Огляд).

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

- «Розробка та впровадження елементів і систем великих декаметрових антен» (№ держ. реєстрації 0116U002159);
- «Дослідження сонячної корони радіоастрономічними методами на декаметрових хвилях» (№ держ. реєстрації 0117U000245);
- «Створення та використання елементів сучасних радіоастрономічних засобів України УТР-2, УРАН, ГУРТ у вітчизняних і міжнародних низькочастотних астрофізичних дослідженнях» (№ держ. реєстрації 0117U002394);
- «Надчутливі і надширокосмугові дослідження окремих об'єктів Всесвіту у низькочастотному діапазоні» (№ держ. реєстрації 0118U003073);

Здобувач є виконавцем даних проєктів.

Мета та задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є виявлення імпульсних сигналів невідомих космічних джерел радіовипромінювання в декаметровому діапазоні. Для досягнення поставленої мети сформульовано наступні ключові задачі:

- провести спостереження на УТР-2 у межах програми досліджень для повного покриття доступної частини неба;
- розробити програми обробки спостережних даних, що дозволять усунути вплив радіочастотних завад, дисперсійної затримки та будуть здатні автоматично знаходити в даних інтенсивні сигнали;
- провести повну обробку даних як програмами автоматичної обробки (що наведені в попередньому пункті), так і алгоритмами для детального, напівавтоматичного аналізу індивідуальних імпульсів;
- знайти та проаналізувати транзйентні сигнали, розподіли їх параметрів і джерела, що можуть їх породжувати.

Об'єктом дослідження є декаметрове випромінювання джерел спорадичного випромінювання Північного неба.

Предметом дослідження є параметри сигналів джерел спорадичного радіовипромінювання, зокрема такі, як міра дисперсії та координати.

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених у дисертаційній роботі задач на радіотелескопі УТР-2 проводились тривалі радіоастрономічні спостереження Північного неба. Були використані методи спектральної та статистичної обробки спостережних даних і очистки їх від завад. Для отримання параметрів шуканих сигналів використовувалися розроблені програми для усунення дисперсійної затримки імпульсів, пошуку інтенсивних подій у даних та програми для їх візуалізації. Методами статистичної обробки сигналів були побудовані розподіли їх параметрів і порівняні з аналогічними розподілами відомих джерел космічного радіовипромінювання.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше в декаметровому діапазоні проведено повний огляд Північного неба з метою пошуку джерел транзйентного випромінювання.

Розроблені програми конвеєрної обробки даних спостережень, створено базу даних протектованих сигналів. Знайдено 380 сигналів, які мають відносну інтенсивність (далі – також співвідношення «Сигнал/Шум» або «С/Ш») більше 8 та відповідають критеріям космічного походження. Велика точність визначення значення міри дисперсії дозволяє виключити з числа знайдених сигналів імпульси відомих пульсарів.

2. За допомогою розробленого методу інвертування даних у часі доведено, що знайдені сигнали не можуть бути пояснені ефектом мерехтіння континуального випромінювання космічних джерел в іоносфері, як і належати до певного типу штучних завад, котрі часто повторюються.

3. В результаті проведеного в декаметровому діапазоні огляду вперше виявлено 380 джерел транзйентного випромінювання. Порівняння побудованих розподілів по мірі дисперсії, галактичній широті, залежностям інтенсивності від ймовірності появи знайдених сигналів таким, які мають пульсари, транзйенти, що обертаються, та аномально інтенсивні імпульси пульсарів вказує на те, що виявлені сигнали мають космічне походження.

Практичне значення отриманих результатів. Оскільки виявлені спорадичні сигнали, як припускається, пов'язані з нейтронними зорями, велика кількість знайдених імпульсів у декаметровому діапазоні підтверджує перспективність таких досліджень і може більше зосередити увагу дослідників на створенні високочутливих інструментів саме в низькочастотному діапазоні. Нові дані з розподілами параметрів сигналів можуть бути використані при створенні теорії популяційного синтезу та дослідження можливого еволюційного зв'язку окремих населень нейтронних зір, таких як різні типи пульсарів, радіотранзйенти, що обертаються та ін.

Особистий внесок автора полягає в активному зборі й аналізі літературних даних за темою дисертації, у проведенні великої кількості радіоастрономічних спостережень на УТР-2, в участі в розробці програм обробки й аналізу даних, в обробці більшої частини даних цих спостережень (заключні етапи обробки автор проводив особисто майже повністю) та аналізі й інтерпретації отриманих результатів. Автор брав участь у постановці задач, аналізі, обговоренні й узагальненні отриманих результатів і формулюванні висновків. Також внесок автора полягає в підготовці матеріалів для публікацій за темою досліджень, підготовці доповідей і представлення результатів роботи на конференціях і семінарах.

Автор дуже вдячний своєму науковому керівнику д.ф.-м.н. Захаренку В. В. за допомогу в постановці задач, обговоренні й аналізі отриманих результатів, Радіоастрономічному інституту НАН України (РІ НАНУ) за можливість проводити дослідження на унікальному радіотелескопі УТР-2, колегам із відділення низькочастотної радіоастрономії РІ НАНУ за цінні поради, плідне обговорення та зауваження на семінарах протягом виконання даної роботи, колективу НДІ Астрономії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна за допомогу в обговоренні результатів дисертації.

Достовірність та обґрунтованість результатів роботи. У випадку дослідження одиночних сигналів неможливо прямо підтвердити їх космічну природу. Саме цим їх дослідження кардинально відрізняється від дослідження, скажімо, пульсарів, які мають строгу періодичність приходу імпульсів. Автоматична обробка сигналів, якісна очистка даних від радіочастотних завад, висока точність визначення закону частотно-часової затримки сигналу та наявність деяких інших ознак (таких, як вигляд розподілу сигналів за галактичною широтою та за мірою дисперсії, невисока інтенсивність імпульсів і подібність розподілу сигналів за інтенсивністю розподілу аномально інтенсивних і гігантських імпульсів пульсарів за енергією), дозволяють досить впевнено констатувати, що в даній роботі була виявлена велика кількість спорадичних сигналів, що породжені унікальними космічними джерелами радіовипромінювання.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи були представлені в 13 доповідях на таких вітчизняних і міжнародних наукових конференціях:

- 14th Kharkiv Young Scientist Conference on Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics (Kharkiv, Ukraine, October 14 – 17, 2014);
- 15-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School: “Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology, Cosmomicrophysics, Astroparticle Physics, Radio astronomy and Astrobiology” (Odesa, Ukraine, August 16–23, 2015);
- International Young Scientists Forum on Applied Physics (Dnipro, Ukraine, September 29 – October 2, 2015);
- 23rd Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics (Kyiv, Ukraine, April 25-30, 2016);
- 9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves MSMW'2016 (Kharkiv, Ukraine, June 21-24, 2016);
- 16th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School: «Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology, Cosmomicrophysics, Astroparticle Physics, Radio astronomy and Astrobiology» (Odesa, Ukraine, August 14-20, 2016);
- II International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (Kharkiv, Ukraine, October 10 – 14, 2016);
- 17th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School: “Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology and Gravitation, Cosmomicrophysics, Radio astronomy and Astrobiology” (Odesa, Ukraine, August 13-20, 2017);
- 2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (Lviv, Ukraine, October 17-20, 2017)

Публікації. Результати дисертації опубліковані у 20 наукових працях: 7 статей у наукових фахових (5 в українських і 2 – в зарубіжних)

виданнях (в т. ч. 2 статті у виданнях, що входять до наукометричної бази Web of Science і одна – у виданні, що входить до наукометричної бази Scopus) і 13 тез доповідей наукових конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг роботи складає 192 сторінки. Вона містить 58 рисунків, 2 таблиці та список використаних джерел зі 117 найменувань на 13 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

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

Перший розділ присвячений аналізу наукової літератури за темою дисертаційної роботи. В ньому зроблений детальний огляд відомих і гіпотетичних космічних джерел періодичного та спорадичного радіовипромінювання, проаналізована ймовірність їх випромінювання в низькочастотному діапазоні. Були проаналізовані переваги та недоліки декаметрового діапазону при проведенні спостережень таких джерел.

Розглянуті пошукові огляди таких джерел, які проводилися на інших радіотелескопах і на більш високих частотах радіодіапазону. Також були розглянуті різні типи радіочастотних завад, що імітують сигнали космічної природи. Показано, що найкращим інструментом для проведення такого огляду є найбільший у світі радіотелескоп даного діапазону – УТР-2. В заключній частині розділу показана важливість і значущість радіоастрономічних досліджень у декаметровому діапазоні.

Другий розділ дисертаційної роботи містить оригінальну методіку спостережень та алгоритми обробки спостережних даних, що є необхідними для пошуку джерел спорадичного радіовипромінювання в декаметровому діапазоні довжин хвиль. Крім того, в ньому сформульовано концепцію, мету та задачі огляду.

Була проведена велика кількість спостережень на УТР-2 з метою завершення покриття всієї доступної частини небесної сфери. У розділі описані параметри даного дослідження. Діапазон схилень лежить у межах від -10° до 90° . Спостереження проводяться п'ятьма променями, в режимі «drift-scan» (антена направлена в меридіан на певному значенні схилення δ і за рахунок обертання Землі записується смуга неба шириною приблизно 2.5° за δ). Таким чином, вся небесна сфера має бути покрита спостереженнями за 40 діб. Ці 40 діб були розбиті на 80 спостережних ночей, із метою зменшення впливу радіочастотних завад. Часова роздільна здатність у дослідженні складає 8 мс (це пов'язано з типовою сталою часу розсіяння відомих пульсарів: лише в кількох вона менша за це значення, тому 8 мс для пошуку нових джерел цілком достатньо). Частотний діапазон – $16.5 \div 33$ МГц, це верхня частина робочого діапазону УТР-2. Дана смуга була обрана з міркувань, у першу чергу, меншого впливу радіочастотних завад, ніж на

частотах нижче 16 МГц. Загальна тривалість записаних спостережних даних складає близько 5000 год, а їх розмір на дисках – порядку 100 Тб.

Увесь масив даних був оброблений за допомогою спеціальних програм. Перша частина конвеєру обробки – «довгий конвеєр» – є повністю автоматизованим етапом і включає очистку від радіочастотних завад, компенсацію впливу дисперсійної затримки в міжзоряному середовищі та пошук інтенсивних індивідуальних імпульсів. Після цього всі дані були візуалізовані за допомогою великої кількості зображень – графіків «Міра дисперсії – Час» і проведена їх візуальна перевірка з метою пошуку інтенсивних сигналів, що відповідають встановленим критеріям космічного походження. В результаті цієї перевірки було відібрано приблизно 3300 сигналів, які далі потрібно було аналізувати більш детально.

Третій розділ присвячений опису наступних етапів обробки й аналізу виявлених сигналів-кандидатів. Для цього був розроблений комплекс програм багатопараметричної, напівавтоматичної обробки індивідуальних сигналів – «короткий конвеєр». В результаті його роботи було відсіяно 2/3 сигналів, які на попередньому етапі не були схожими на завади, проте аналіз спектрів дозволив ідентифікувати їх справжню природу, яка виявилася завадовою. Після цього етапу лишилося приблизно 1000 «кандидатів», чие випромінювання на динамічному спектрі (який дозволив проаналізувати «короткий конвеєр») виглядає як космічне (порівняння транзйентного сигналу з індивідуальним імпульсом відомого пульсара наведено на рис. 1).

Було висловлено припущення, що серед «кандидатів» могла лишитися певна кількість завад, породжених мерехтінням радіовипромінювання континуальних джерел на неоднорідностях іоносфери. Для перевірки цієї гіпотези спостережні дані були інвертовані в часі й оброблені, як і звичайні (тобто здійснювався пошук ймовірних сигналів зі «зворотньою» мірою дисперсії, чия часова затримка пропорційна не f^{-2} , а $-f^{-2}$) (ілюстрація наведена на рис. 2). Обробка 10% даних таким методом дозволила виявити 100 сигналів, проте відносна інтенсивність (С/Ш) жодного з них не перевищувало значення 7.2. Крім того, їх порівняння з сигналами-кандидатами показало кардинальні відмінності між ними й абсолютно різне походження (рис. 3).

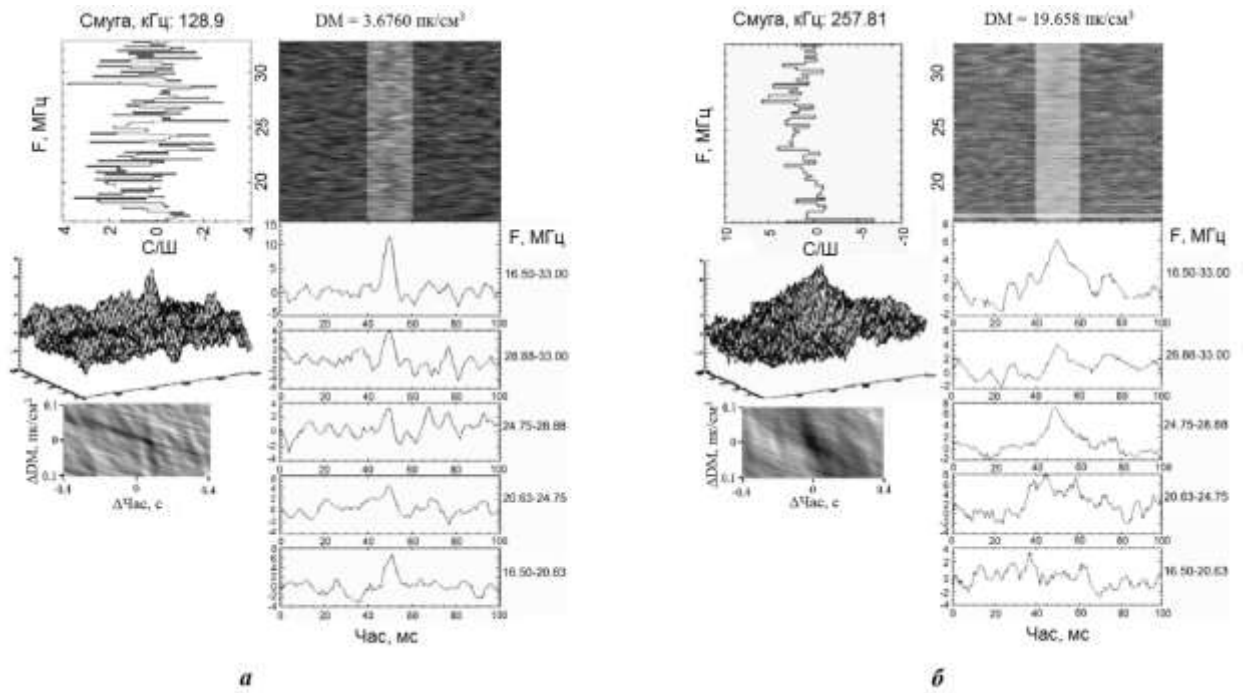


Рис. 1. Приклад транзйентного сигналу від невідомого джерела – а, слабкий імпульс пульсара PSRB1508+55 – б.

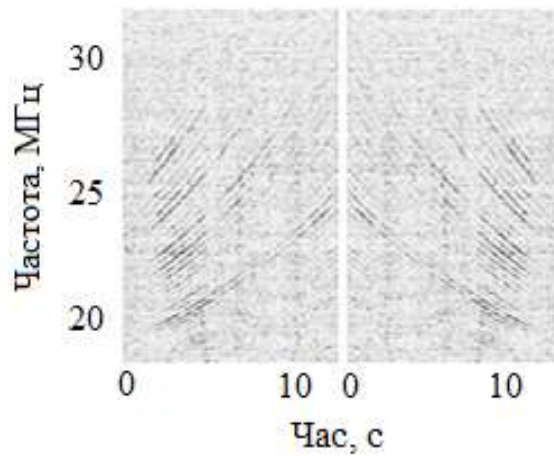


Рис. 2. Сигнали пульсара PSRB0809+74, інвертовані в часі для аналізу зі «зворотною» дисперсійною залежністю (зліва). Справа для порівняння наведені вихідні дані.

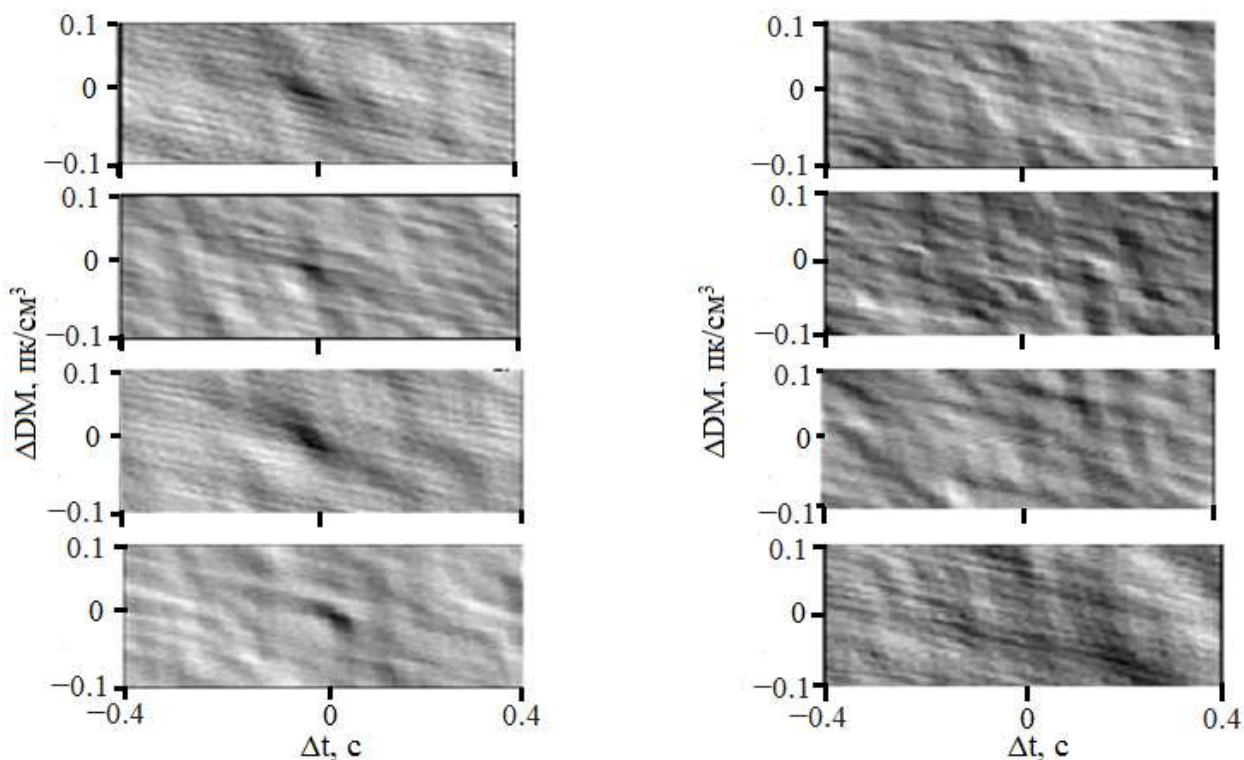


Рис. 3. Двовимірні залежності «DM – Час» (± 0.1 пк/см³ за DM і ± 400 мс – за часом). Зліва – сигнали-кандидати, знайдені в огляді. Справа – залежності «DM – Час» для імпульсів зі «зворотною» мірою дисперсії (дисперсійне запізнення пропорційне $-f^{-2}$). Для сигналів-кандидатів характерна наявність похилого овалу підвищеної інтенсивності в центрі двовимірної залежності (як і в космічних сигналах). У сигналів, що знайдені при інвертуванні спектрограм, такий широкий максимум не спостерігається.

Оскільки сигнали зі «зворотною» DM мають явно завадову природу та їх відносна інтенсивність не перевищує 7.2, то можна зробити висновок, що випадкові викиди інтенсивності (незалежно від знаку закону частотно-часової залежності) можуть давати максимальний С/Ш імпульсу не більше 8. Тому для усунення ймовірних низькоінтенсивних завад із переліку «кандидатів», був введений новий поріг – видалені всі імпульси, що мають С/Ш менше 8. Сигналів, що перевищують такий рівень, виявилось 380.

Після цього були побудовані розподіли різних параметрів цих 380 імпульсів. Розподіл за часом появи показав, що сигнали розподілені приблизно рівномірно протягом часу спостережень (рис. 4). Розподіл С/Ш сигналів із «прямою» мірою дисперсії дуже схожий на розподіл ймовірності появи аномально інтенсивних імпульсів пульсарів (АІІ) залежно від інтенсивності та кардинально відрізняється від аналогічного розподілу сигналів зі «зворотною» DM (рис. 5). Розподіл DM сигналів, знайдених у огляді (рис. 6, згори), якісно схожий на модельний розподіл відомих пульсарів, які можна буде спостерігати на радіотелескопі SKA (рис. 7), той самий розподіл сигналів зі «зворотною» DM теж виглядає зовсім інакше (рис. 6, внизу). Крім того, був побудований розподіл 380 імпульсів за

галактичною широтою, порівняння його з аналогічним розподілом для 98 відомих близьких пульсарів (що мають $DM < 30$ пк/см³ та періоди більше 0.2 с) показало їх якісну подібність (рис. 8).

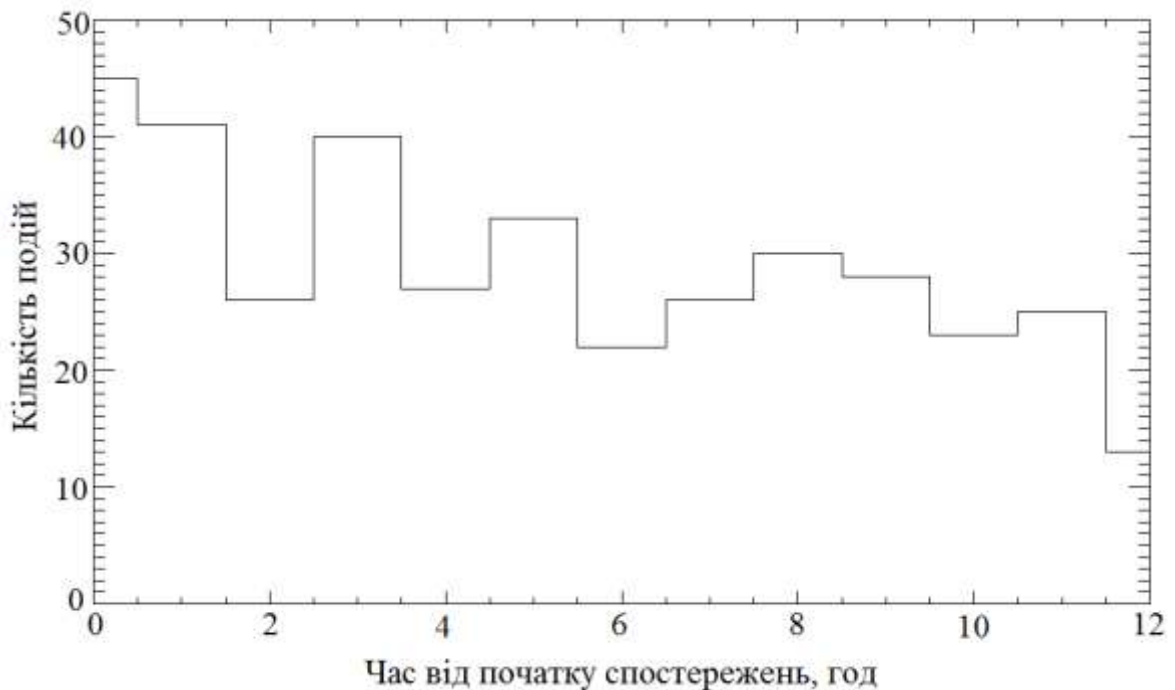


Рис. 4. Розподіл кількості подій у залежності від часу сеансу спостережень 380 сигналів, які мають С/Ш більше 8.

Велика кількість знайдених сигналів потребує пояснення. Оскільки конус випромінювання пульсарів розширюється приблизно у 2 рази навіть у випадку близьких частот (100 та 25 МГц), кількість доступних для спостереження пульсарів зростає приблизно в тій самій пропорції. Відомих пульсарів із мірою дисперсії до 30 пк/см³ і які мають координати, що доступні для УТР-2, налічується близько 80 й нещодавно було знайдено ще декілька. Тож для оцінки можна припустити, що для спостережень на високих частотах доступні 100 пульсарів. Тоді на низьких має бути доступно для детектування вдвічі більше – 200. Саме тому, крім відомих у декаметровому діапазоні 40 таких джерел, можна сподіватися на детектування ще 160 пульсарів.

Залишків наднових, що отримали назву «радіотранзїєнти, що обертаються», існує ще більше. Припускається, що їх популяція приблизно утричі більша, ніж пульсарів, тому в декаметровому діапазоні можна говорити про 600 таких джерел, які потенційно доступні для спостережень. В даний час відомо трохи більше ста RRAT, відкритих на високих частотах. У декаметровому діапазоні вони відкриті поки що не були.

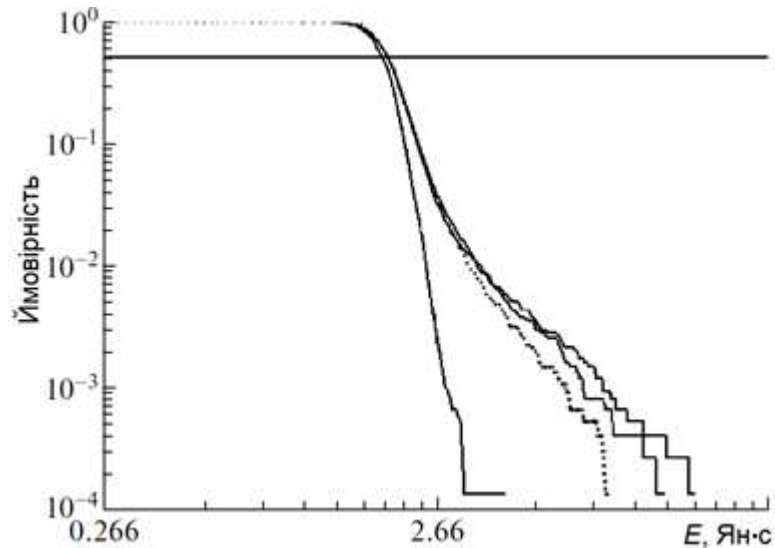
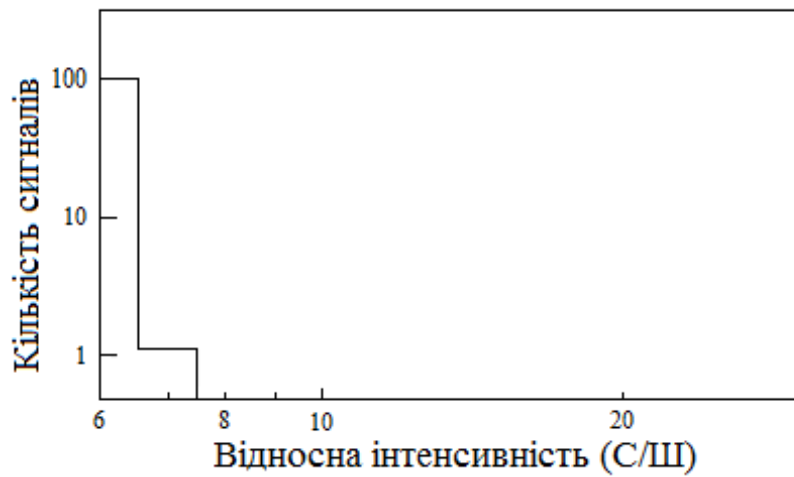
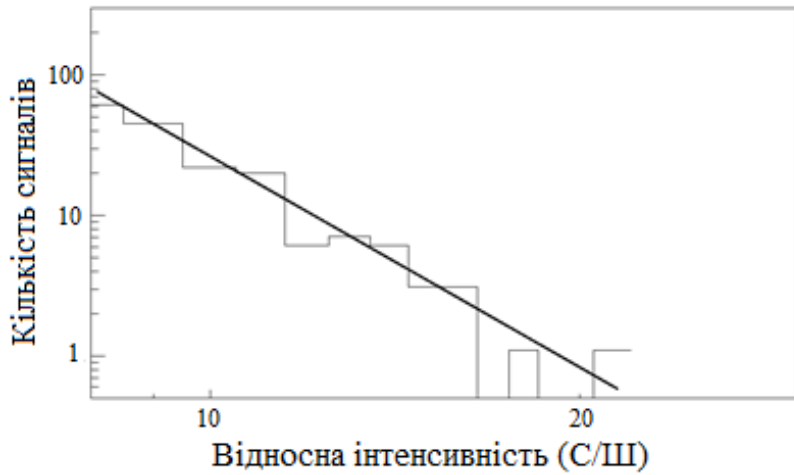


Рис. 5. Відносна інтенсивність (С/Ш) (у логарифмічних координатах) для протектованих сигналів із «прямою» (згори) та «зворотньою» (посередині) мірами дисперсії. Розподіли енергій радіоімпульсів (АІІ) пульсара PSR B0809+74 на 23.7 МГц наведено на нижньому рисунку.

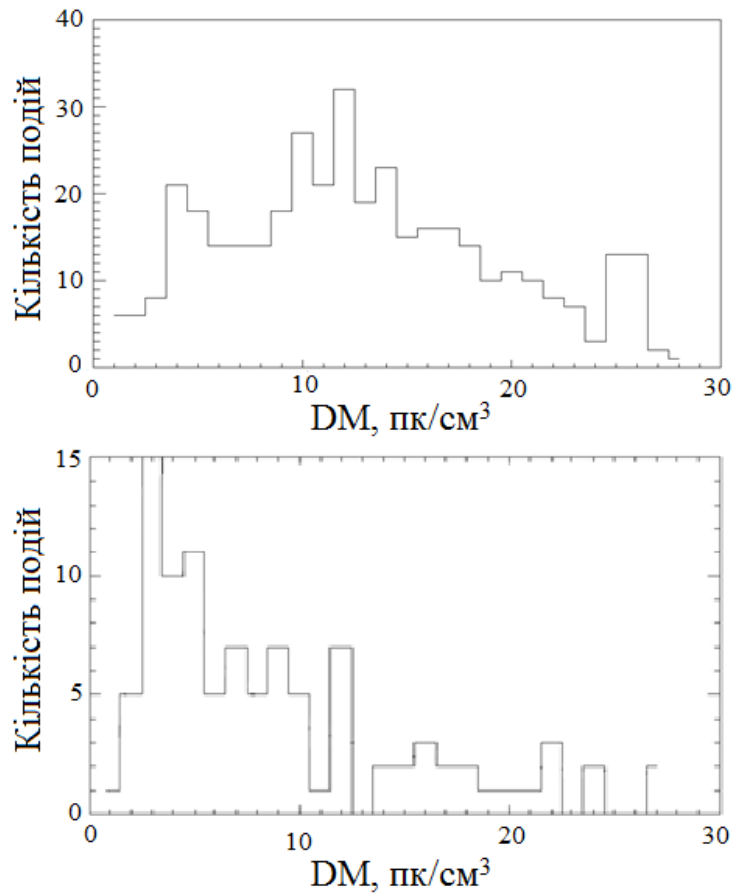


Рис. 6. Розподіл за мірою дисперсії 380 сигналів із $C/I > 8$, протектованих в огляді (згори) і 100 сигналів зі «зворотніми» мірами дисперсії (внизу).

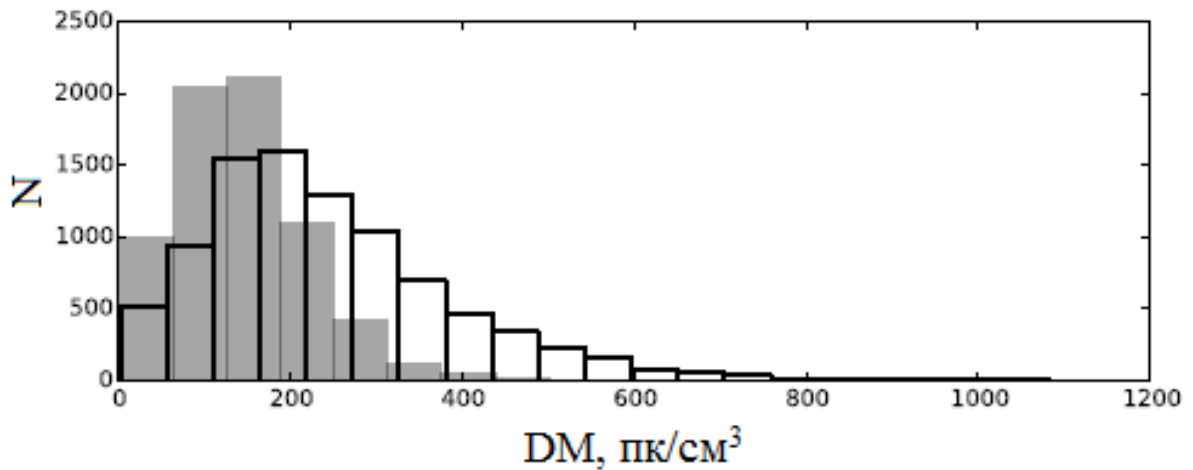


Рис. 7. Модельний розподіл за мірою дисперсії відомих пульсарів, які мають бути відкриті в майбутньому на телескопі SKA на частотах 50-350 МГц (сірі стовпчики) і вище 350 МГц (білі).

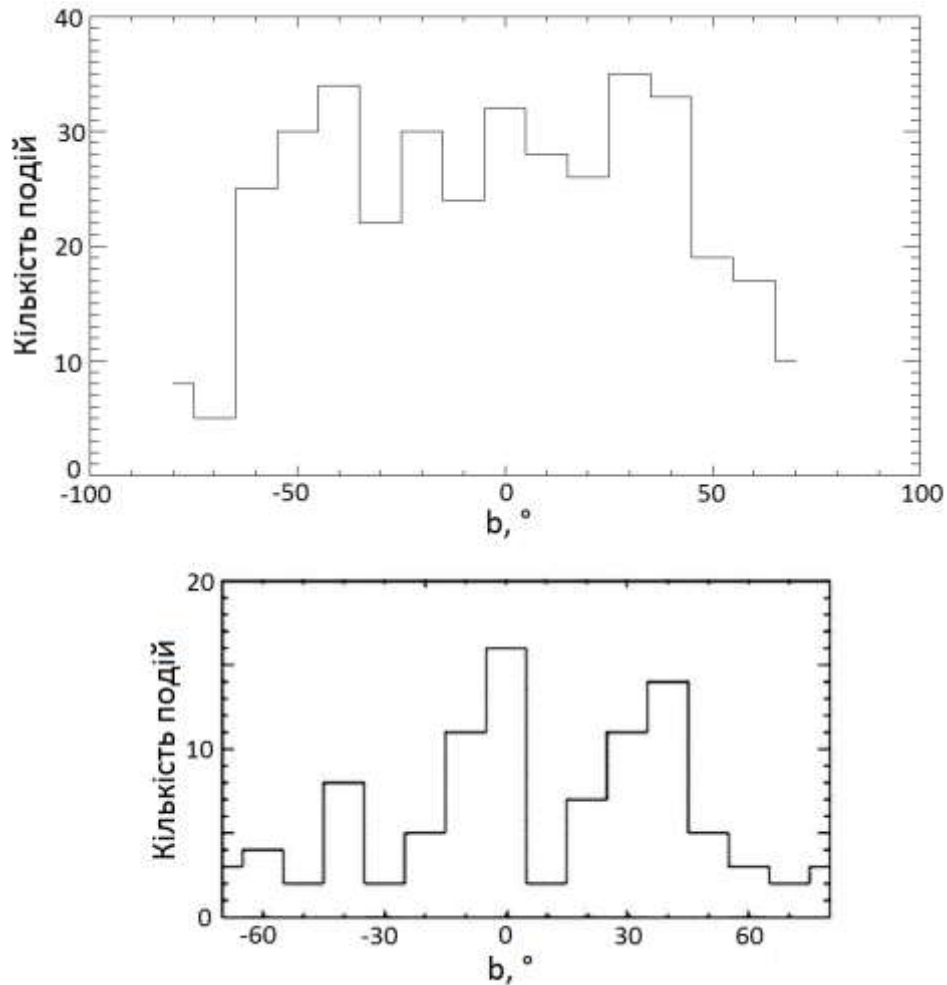


Рис. 8. Розподіли за галактичною широтою знайдених у огляді сигналів-кандидатів (верхня панель) і відомих пульсарів із $DM < 30$ пк/см³ та періодом, більшим за 0.2 с (внизу, 98 близьких пульсарів).

Іншими типом об'єктів, що потенційно доступні для спостережень у низькочастотному діапазоні, є одиночні радіотихі рентгенівські нейтронні зорі, пульсари із крутими спектральними індексами (близько -3), гігантські імпульси мілісекундних пульсарів, «радіовідлуння» злиття нейтронних зір, електростатичні розряди у викидах вулканів близьких екзопланет, а також певні земні та космічні джерела невідомої природи.

Виходячи зі сказаного, можна очікувати порядку 1000 джерел спорадичних сигналів різноманітної природи, які можуть бути продетектовані за допомогою найбільшого у світі радіотелескопу декаметрового діапазону.

Такі огляди джерел слід повторювати в майбутньому неодноразово. Напрацьований комплекс програм, методики спостережень і методів обробки роблять ці дослідження ефективними й інформативними, а оскільки мова йде про найближче зоряне оточення, то також, безсумнівно, дуже цінними для астрономії.

ВИСНОВКИ

У результаті проведених комплексних досліджень, була повністю досягнута головна мета даної дисертаційної роботи: серед спостережних даних, отриманих на радіотелескопі УТР-2, була виявлена велика кількість імпульсних сигналів невідомих джерел радіовипромінювання в декаметровому діапазоні. Ці сигнали були виділені на фоні завад та імпульсів відомих пульсарів завдяки проведеній повній обробці всього масиву спостережних даних, а також завдяки детальному та багатопараметричному (точна підстройка значення міри дисперсії, параметрів замивання фону і т. д.) аналізу всіх знайдених інтенсивних сигналів. Показано, що ці сигнали мають космічну природу.

Отже, головні оригінальні результати роботи такі:

1. Вперше в декаметровому діапазоні проведено повний огляд Північного неба з метою пошуку джерел транзієнтного радіовипромінювання. Розроблені програми конвеєрної обробки даних спостережень, створено базу даних протектованих сигналів. Знайдено 380 сигналів, які мають співвідношення «Сигнал/Шум» (відносна інтенсивність) більше 8 та відповідають критеріям космічного походження. Велика точність визначення значення міри дисперсії дозволяє виключити з числа знайдених сигналів імпульси відомих пульсарів.

2. За допомогою розробленого методу інвертування даних у часі доведено, що знайдені сигнали не можуть бути пояснені ефектом мерехтінь континуального випромінювання космічних джерел в іоносфері, як і належати до певного типу штучних завад, котрі часто повторюються.

3. В результаті проведеного огляду в декаметровому діапазоні вперше виявлено 380 джерел транзієнтного випромінювання. Порівняння побудованих розподілів по мірі дисперсії, галактичній широті, залежностям інтенсивності від ймовірності появи знайдених сигналів таким, які мають пульсари, транзієнти, що обертаються, та аномально інтенсивні імпульси пульсарів вказує на те, що виявлені сигнали мають космічне походження.

Загалом отримані результати підтверджують необхідність проведення подібних досліджень на низьких частотах і яскраво демонструють переваги низькочастотного (зокрема, декаметрового) діапазону для пошуку спорадичних сигналів різної природи (в першу чергу, породжених різними типами нейтронних зір). Показана перспективність, актуальність та значущість таких досліджень на високочутливих інструментах декаметрового діапазону, одним із яких є радіотелескоп УТР-2.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці в наукових фахових виданнях України:

1. V. V. Zakharenko, I. P. Kravtsov, I. Y. Vasylieva, S. S. Mykhailova, O. M. Ulyanov, A. I. Shevtsova, A. O. Skoryk, P. Zarka, O. O. Konovalenko.

Decameter Pulsars and Transients Survey of the Northern Sky. Status, First Results, Multiparametric Pipeline for Candidate Selection // *Odessa Astronomical Publications*. 2015. Vol. 28/2, №2. P. 252–255. (*Особистий внесок здобувача: проведення спостережень на радіотелескопі УТР-2, обробка даних, участь у створенні програм обробки, в написанні тексту статті*).

2. I. P. Kravtsov, V. V. Zakharenko, I. Y. Vasylieva, S. S. Mykhailova, O. M. Ulyanov, A. I. Shevtsova, A. O. Skoryk, P. Zarka, O. O. Konovalenko. Search for Transient Signals in the Data of Decameter Survey of Northern Sky // *Advances in Astronomy and Space Physics*. 2016. Vol. 6, Issue 2. P. 79–84 (Web of Science). (*Особистий внесок здобувача: проведення спостережень на радіотелескопі УТР-2, обробка даних, участь у написанні тексту статті та у створенні програм обробки даних*).

3. I. P. Kravtsov, V. V. Zakharenko, I. Y. Vasylieva, S. S. Mykhailova, O. M. Ulyanov, A. I. Shevtsova, A. O. Skoryk. Parameters of the Transient Signals Detected in the Decameter Survey of the Northern Sky // *Odessa Astronomical Publications*. 2016. Vol. 29. P. 179–183. (*Особистий внесок здобувача: проведення спостережень на радіотелескопі УТР-2, обробка даних, участь у написанні тексту статті й у створенні програм обробки даних*).

4. В. В. Захаренко, И. П. Кравцов, Я. Ю. Васильева. Декаметровый обзор Северного неба с целью поиска пульсаров и источников транзиентного излучения. Параметры индивидуальных импульсов // *Радиофизика и радиоастрономия*. 2017. Т. 22, №1. С. 31–44. (*Особистий внесок здобувача: проведення спостережень на радіотелескопі УТР-2, обробка даних, участь у створенні програм обробки та в написанні тексту статті*).

5. А. А. Скорик, О. М. Ульянов, В. В. Захаренко, А. И. Шевцова, Я. Ю. Васильева, М. С. Плахов, И. П. Кравцов. Тонкая структура аномально интенсивных импульсов пульсара J0814+7429 в декаметровом диапазоне // *Радиофизика и радиоастрономия*. 2017. Т. 22, №2. С. 93–111. (*Особистий внесок здобувача: участь у спостереженнях, попередній обробці даних та в оформленні статті*).

Наукові праці в зарубіжних наукових фахових виданнях:

6. A. Konovalenko, L. Sodin V. Zakharenko, P. Zarka, O. Ulyanov, M. Sidorchuk, S. Stepkin, P. Tokarsky, V. Melnik, N. Kalinichenko, A. Stanislavsky, V. Koliadin, V. Shepelev, V. Dorovskyy, V. Ryabov, A. Koval, I. Bubnov, S. Yerin, A. Gridin, V. Kulishenko, A. Reznichenko, V. Bortsov, V. Lisachenko, A. Reznik, G. Kvasov, D. Mukha, G. Litvinenko, A. Khristenko, V. V. Shevchenko, V. A. Shevchenko, A. Belov, E. Rudavin, I. Vasylieva, A. Mirosnichenko, N. Vasilenko, M. Olyak, K. Mylostna, A. Skoryk, A. Shevtsova, M. Plakhov, I. Kravtsov, Y. Volvach, O. Lytvinenko, N. Shevchuk, I. Zhouk, V. Bovkun, A. Antonov, D. Vavriv, V. Vinogradov, R. Kozhin, A. Kravtsov, E. Bulakh, A. Kuzin, A. Vasilyev, A. Brazhenko, R. Vashchishin, O. Pylaev, V. Koshovyy, A. Lozinsky, O. Ivantyshin, H. O. Rucker,

M. Panchenko, G. Fischer, A. Lecacheux, L. Denis, A. Coffre, J.-M. Grießmeier, M. Tagger, J. Girard, D. Charrier, C. Briand, G. Mann. The modern radio astronomy network in Ukraine: UTR-2, URAN and GURT // *Experimental Astronomy*. 2016. Vol. 42. P. 11–48 (Scopus). *(Особистий внесок здобувача: участь у підготовці розділу №3 і №4).*

7. V. Zakharenko, A. Konovalenko, P. Zarka, O. Ulyanov, M. Sidorchuk, S. Stepkin, V. Koliadin, N. Kalinichenko, A. Stanislavsky, V. Dorovskyy, V. Shepelev, I. Bubnov, S. Yerin, V. Melnik, A. Koval, N. Shevchuk, I. Vasylieva, K. Mylostna, A. Shevtsova, A. Skoryk, I. Kravtsov, Y. Volvach, M. Plakhov, N. Vasilenko, Y. Vasylykivskyi, D. Vavriv, V. Vinogradov, R. Kozhin, A. Kravtsov, E. Bulakh, A. Kuzin, A. Vasilyev, V. Ryabov, A. Reznichenko, V. Bortsov, V. Lisachenko, G. Kvasov, D. Mukha, G. Litvinenko, A. Brazhenko, R. Vashchishin, O. Pylaev, V. Koshovyy, A. Lozinsky, O. Ivantyshin, H. O. Rucker, M. Panchenko, G. Fischer, A. Lecacheux, L. Denis, A. Coffre, J.-M. Grießmeier. Digital Receivers for Low-Frequency Radio Telescopes UTR-2, URAN, GURT // *Journal of Astronomical Instrumentation*. 2016. Vol. 5. P. 1641010 – 738 (Web of Science). *(Особистий внесок здобувача: участь в обговоренні результатів і підготовці розділу №4).*

Наукові праці апробаційного характеру (тези доповідей на наукових конференціях) за темою дисертації:

8. I. P. Kravtsov, V. V. Zakharenko. Search for non-impulse decameter radiation of PSR B0809+74 // 14th Kharkiv Young Scientist Conference on Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics, October 14 – 17, 2014: CD of abstracts. Kharkiv, Ukraine, 2014. RAA-7 – Oral. *(Особистий внесок здобувача: проведення спостережень, участь в обробці й аналізі даних та підготовці тез і доповіді для виступу).*

9. Zakharenko V. V., Kravtsov I. P., Vasylieva I. Y., Ulyanov O. M., Shevtsova A. I., Skoryk A. O., Mykhailova S. S., Konovalenko O. O., Zarka P. The first results of transient signal processing in Decameter pulsar/transient Survey of northern sky // *Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology, Cosmomicrophysics, Astroparticle Physics, Radioastronomy and Astrobiology: proceedings of 15-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School*, August 16 – 23, 2015: Abstract. – Odesa, Ukraine. Oral. *(Особистий внесок здобувача: проведення спостережень, обробка даних, участь у створенні програм для обробки, підготовка тез для публікації і доповіді).*

10. A. O. Skoryk, O. M. Ulyanov, V. V. Zakharenko, A. I. Shevtsova, Y. U. Vasylieva, I. P. Kravtsov, M. S. Plakhov. Fine structure of the pulsar decameter radiation as the probe of the propagation media // *International Young Scientists Forum on Applied Physics (YSF)*, 29 September – 2 October 2015: CD of abstracts. Dnipro, Ukraine, 2015. RAA-4 – Oral. DOI: 10.1109/YSF.2015.7333257 (Scopus) *(Особистий внесок здобувача: участь в*

обговоренні результатів роботи та спостереженнях, а також у підготовці матеріалів для тез).

11. Shevtsova A. I., Ulyanov O. M., Skoryk A. O., Zakharenko V. V., Vasylieva I. Y., Kravtsov I. P. Rotation Measure Calculation Algorithm for Pulse Radiation in Decameter Range // International Young Scientists Forum on Applied Physics (YSF), 29 September – 2 October 2015: CD of abstracts. Dnipro, Ukraine, 2015. RAA–9 – Oral.(DOI: 10.1109/YSF.2015.7333262 (Scopus). *(Особистий внесок здобувача: участь в обговоренні результатів роботи, спостереженнях і підготовці матеріалів для тез).*

12. Zakharenko V. V., Kravtsov I. P., Vasylieva I. Y., Ulyanov O. M., Shevtsova A. I., Skoryk A. O., Konovalenko O. O., Mykhailova S. S., Zarka P. Decameter Pulsar/Transient Survey of Northern Sky. Multiparametric Pipeline Candidate Selection // International Young Scientists Forum on Applied Physics (YSF), 29 September – 2 October 2015: CD of abstracts. Dnipro, Ukraine, 2015. RAA–8 – Oral. DOI: 10.1109/YSF.2015.7333261 (Scopus). *(Особистий внесок здобувача: обробку даних, проведення спостережень, участь у створенні програм для обробки даних, підготовка тез для публікації та доповіді).*

13. Zakharenko V. V., Kravtsov I. P., Vasylieva I. Y., Ulyanov O. M., Shevtsova A. I., Skoryk A. O., Mykhailova S. S., Konovalenko O. O., Zarka P. Decameter survey of pulsars and transients of the Northern Sky. Current status // 23rd Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics (YSC 2016), April 25–30, 2016: Book of Abstracts. Kyiv, Ukraine, 2016. P. 16 – Oral. *(Особистий внесок здобувача: обробка даних, проведення спостережень, участь у розробці програм обробки, підготовка доповіді та тез для публікації).*

14. I. P. Kravtsov, V. V. Zakharenko, I. Y. Vasylieva, O. M. Ulyanov, A. I. Shevtsova, A. O. Skoryk, S. S. Mykhailova. Decameter Pulsars and Transients Survey of the Northern Sky. Observations and Data Processing // 9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves MSMW'2016, June 21–24, 2016: Conference Paper. Kharkiv, Ukraine, 2016. Oral. DOI: 10.1109/MSMW.2016.7538020 (Scopus). *(Особистий внесок здобувача: обробка даних, проведення спостережень, участь у створенні програм обробки, підготовка доповіді та конференційної статті для публікації).*

15. Kravtsov I. P., Zakharenko V. V., Vasylieva I. Y., Mykhailova S. S., Ulyanov O. M., Shevtsova A. I., Skoryk A. O. Parameters of the Transient Signals Detected in the Decameter Survey of the Northern Sky // Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology, Cosmomicrophysics, Astroparticle Physics, Radioastronomy and Astrobiology: proceedings of 16-th Odesa International Astronomical Gamow Conference-School, August 14–20, 2016: Book of Abstracts. Odesa, Ukraine, 2016. P. 30 – Oral. *(Особистий внесок здобувача: проведення спостережень, обробка даних, участь у створенні програм обробки даних, підготовка доповіді та тез для публікації).*

16. Vyacheslav Zakharenko, Serge Yerin, Igor Bubnov, Iaroslavna Vasilieva, Ihor Kravtsov. Using of Pulsar Spectra Catalogue at Frequencies Below 80 MHz for Astronomical Calibration of Phased Antenna Arrays // 2016 International Young Scientists Forum on Applied Physics (YSF), October 10-14, 2016: Conference Paper. Kharkiv, Ukraine, 2016. RAA-5 – Oral DOI: 10.1109/YSF.2016.7753839 (Scopus). *(Особистий внесок здобувача: участь в обговоренні результатів роботи, спостереженнях та підготовці матеріалів для статті).*

17. A. O. Skoryk, O. M. Ulyanov, V. V. Zakharenko, A. I. Shevtsova, Y. U. Vasyliieva, I. P. Kravtsov, M. S. Plakhov. Fine structure of the PSR B0809+74 individual pulses in decameter wave range // 2016 International Young Scientists Forum on Applied Physics (YSF), October 10–14, 2016: CD of Abstracts. Kharkiv, Ukraine, 2016. RAA-3 – Oral. *(Особистий внесок здобувача: участь в обговоренні результатів роботи, спостереженнях і підготовці матеріалів для статті).*

18. I. P. Kravtsov, V. V. Zakharenko, I. Y. Vasyliieva, O. M. Ulyanov, A. I. Shevtsova, A. O. Skoryk, S. S. Mykhailova. Data Processing of the Low Frequency Pulsars and Transients Survey of the Northern Sky // 2016 International Young Scientists Forum on Applied Physics (YSF), October 10–14, 2016: CD of Abstracts. Kharkiv, Ukraine, 2016. RAA-6 – Oral. *(Особистий внесок здобувача: проведення спостережень, обробка даних, участь у створенні програм для їх обробки, участь у підготовці тез для публікації і доповіді).*

19. V. V. Zakharenko, I. P. Kravtsov, Ia. Y. Vasyliieva. Pulsar Discovering Jubilee. 50 Years of Transient Investigation Era // Astronomy and Beyond: Astrophysics, Cosmology, Cosmomicrophysics, Astroparticle Physics, Radioastronomy and Astrobiology: proceedings of 17-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School, August 13-20, 2017: Book of Abstracts. Odesa, Ukraine, 2017. P. 8 – Oral. *(Особистий внесок здобувача: проведення спостережень, обробка даних, участь у створенні програм для їх обробки та підготовці тез для публікації).*

20. I. P. Kravtsov, V. V. Zakharenko, I. Y. Vasyliieva, O. M. Ulyanov, A. I. Shevtsova, A. O. Skoryk, S. S. Mykhailova. Analysis of the Transient Signals in Decameter Survey of the Northern Sky // 2017 IEEE INTERNATIONAL YOUNG SCIENTISTS FORUM ON APPLIED PHYSICS AND ENGINEERING YSF-2017, October 17 – 20, 2017: CD of Abstracts. Lviv, Ukraine, 2017. MWA-7 – Oral. *(Особистий внесок здобувача: проведення спостережень, обробка даних, участь у створенні програм для їх обробки, участь у підготовці тез для публікації і доповіді).*

АНОТАЦІЯ

Кравцов І. П. Огляд Північного неба з метою пошуку джерел спорадичного радіовипромінювання декаметрових хвиль. – 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 проведенню повного огляду Північного неба з метою пошуку джерел спорадичного радіовипромінювання в декаметровому діапазоні довжин хвиль (далі – Огляд). Проаналізовані переваги та недоліки декаметрового діапазону при проведенні такого дослідження. Розглянуті пошукові огляди таких джерел, що проводилися на інших радіотелескопах та на більш високих частотах радіодіапазону. Також розглянуті різні типи радіочастотних завад, що імітують сигнали космічної природи.

Були проведені необхідні радіоастрономічні спостереження на УТР-2, отримані дані оброблені спочатку програмами автоматичної обробки («довгим конвеєром»), а потім – розробленим комплексом програм для напівавтоматичної обробки («коротким конвеєром»). Було показано, що знайдені сигнали не могли бути породжені мерехтіннями континуальних радіоджерел на неоднорідностях іоносфери. З'ясовано, що випадкові викиди інтенсивності не можуть генерувати сигнали з відносною інтенсивністю, яка перевищує $C/Ш = 8$, тому із розгляду були усунуті імпульси із $C/Ш$ менше 8 (після цього лишилося 380 спалахів).

Були побудовані розподіли різних параметрів сигналів, таких як відносна інтенсивність ($C/Ш$), час появи, міра дисперсії та галактична широта. Аналіз розподілів вищезгаданих параметрів сигналів підтверджує припущення про те, що знайдені сигнали породжені космічними джерелами радіовипромінювання.

Вперше був проведений повний огляд всієї доступної небесної сфери. Завдяки багатопараметричному аналізу було відібрано 380 сигналів, що відповідають критеріям космічного походження, побудовані та проаналізовані розподіли їх параметрів. Порівняння з аналогічними розподілами параметрів відомих джерел показало, що знайдені сигнали мають космічне походження і, таким чином, у роботі було відкрито 380 нових джерел транзйентного радіовипромінювання в декаметровому діапазоні.

Ключові слова: огляд, спорадичні джерела, декаметровий діапазон, УТР-2, пульсари, міра дисперсії, транзйенти.

АННОТАЦІЯ

Кравцов И. П. Обзор Северного неба с целью поиска источников спорадического радиоизлучения декаметровых волн. – Рукопись.

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

Диссертация посвящена проведению полного обзора Северного неба с целью поиска источников спорадического радиоизлучения в декаметровом диапазоне длин волн (далее – Обзор). Проанализированы преимущества и

недостатки декаметрового диапазона при проведении такого исследования. Рассмотрены поисковые обзоры таких источников, которые проводились на других радиотелескопах и на более высоких частотах радиодиапазона. Также рассмотрены различные типы радиочастотных помех, которые имитируют сигналы космического происхождения.

Были проведены необходимые радиоастрономические наблюдения на УТР-2, полученные данные сначала были обработаны программами автоматической обработки («длинным конвейером»), а после этого – разработанным комплексом программ для полуавтоматической обработки («коротким конвейером»). Было показано, что найденные сигналы не могли быть порождены мерцанием континуальных радиоисточников на неоднородностях ионосферы. Выяснено, что случайные выбросы интенсивности не могут генерировать сигналы с относительной интенсивностью, превышающей $C/Ш = 8$, поэтому из рассмотрения были удалены импульсы, имеющие $C/Ш$ меньше 8 (после этого осталось 380 всплесков).

Были построены распределения различных параметров сигналов, таких как относительная интенсивность ($C/Ш$), время появления, мера дисперсии и галактическая широта. Анализ распределений вышеупомянутых параметров сигналов подтверждает предположение о том, что найденные сигналы порождены космическими источниками радиоизлучения.

Впервые был проведен полный обзор всей доступной небесной сферы. Благодаря многопараметрическому анализу были отобраны 380 сигналов, которые отвечают критериям космического происхождения, построены и проанализированы распределения их параметров. Сравнение с аналогичными распределениями параметров известных источников показало, что найденные сигналы имеют космическое происхождение и, таким образом, в работе были открыты 380 новых источников транзиентного радиоизлучения в декаметровом диапазоне.

Ключевые слова: обзор, спорадические источники, декаметровый диапазон, УТР-2, пульсары, мера дисперсии, транзиенты.

ABSTRACT

Kravtsov I. P. Survey of the Northern sky in order to find sporadic radio emission sources in decameter wave range. – The manuscript.

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

The thesis is devoted to conducting a full survey of the Northern sky in order to find unknown sources of sporadic radio emission (hereinafter – the Survey). In present work a detailed review of known and hypothetical cosmic sources of periodic and sporadic radio emission is made, and the probability of their radiation presence in the low-frequency wave range is estimated. The advantages and disadvantages of the low-frequency observations are analyzed. A lot of surveys for

searching of such sources, which were carried out at other radio telescopes and at higher frequencies of the radio frequency range were considered and analyzed. Various types of radio frequency interference which imitate the signals of cosmic origin were considered. It is shown that the best instrument for conducting the Survey is the world's largest radio telescope of this range – UTR-2. The concept, purpose and objectives of the Survey are formulated.

There was carried out a large number of UTR-2 observations. All observational data has been processed with the special routines. The first part of the processing pipeline – the "long pipeline" – is a fully automated stage and includes RFI mitigation, the dispersion delay compensation and the search for intensive individual pulses. After that, all data was visualized and visual checked for the purpose of searching for intensive signals that meet the established criteria of cosmic origin. The next stage of data processing is a semi-automatic pulses analysis using a new routines and algorithms – "short pipeline". It was proved that the transient signals could not be generated by the flickering of continuum radio emission sources on the inhomogeneities of the ionosphere. It has been shown that random emission can't generate noise signals with SNR more than 8. Therefore, a new threshold was introduced: pulses with $SNR < 8$ were removed from the candidates' list. The number of signals that exceed this threshold is 380.

After that, distributions of different parameters (SNR, time of appearance, dispersion measure and galactic latitude) of these pulses were built. The distribution of appearance times has shown that the signals are distributed approximately uniformly over the observation time. The signals' SNRs distribution is very similar to the distribution of the probability of occurrence of anomalously intense pulsar's pulses depending on the intensity. The DMs distribution of signals found in the Survey is quite similar to the simulated DMs distribution of known pulsars, which will be available for observing at the SKA radio telescope. In addition, a distribution of 380 pulses galactic latitudes was built, comparing it with a similar distribution for 98 known close pulsars (which have $DM < 30 \text{ pc/cm}^3$ and periods more than 0.2 s) showed their similarity.

In the thesis the original results are obtained, which extend the frequency range of sporadic radio emission sources studies to decameter wave range. For the first time, a full survey of the entire available part of celestial sphere was conducted. The survey data was fully processed, individual pulse analysis routines were developed, and all identified «candidates» were analyzed. Due to the multi-parametric analysis, 380 signals were selected corresponding to the criteria of cosmic origin; the distributions of their parameters were built and analyzed. Comparison with similar distributions of known sources' parameters showed that the detected signals are the pulses of cosmic origin and, thus, 380 new sources of transient radio emission in the decameter wave range were discovered in present work.

Key words: survey, sporadic sources, decameter wave range, UTR-2, pulsars, dispersion measure, transients.