

ІСТОРІЯ НИЗЬКОЧАСТОТНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПУЛЬСАРІВ

Присвячується 110-річчю Семена Яковича Брауде
та 50-річчю радіотелескопа УТР-2

Предмет і мета роботи: Наведені основні найяскравіші події, які відбувались в початковий період дослідження пульсарів в декаметровому діапазоні. На прикладі головних наукових задач, сформульованих ще на початку цих досліджень, показано, як змінювались акценти та пріоритети досліджень з плином часу, які задачі в решті-решт були вирішені, а які все ще очікують на своє вирішення. Показано, як невпинна модернізація радіотелескопу УТР-2 дозволила набутти нових якостей астрофізичним дослідженням, що проводяться на цьому радіотелескопі, та визначити в них нові наукові напрямки. На прикладі цитованих літературних посилань показано, як розвивались дослідження пульсарів в Україні і як вони інтегрувались в світові астрофізичні дослідження цих унікальних об'єктів.

Мета цієї роботи – на прикладі дослідження пульсарів показати взаємозв'язок між минулим і сьогоденням на більш ніж півсторічному інтервалі часу та продемонструвати, як ті наукові задачі, що були сформульовані в минулому та які неможливо було розв'язати з тодішніми технічними умовами, були розв'язані наступними поколіннями дослідників. Методи і методологія: Методами порівнянь та історичних паралелей показано, як розвивались та еволюціонували низькочастотні дослідження пульсарів майже від їх відкриття аж дотепер.

Результати: Показано, як кількісні перетворення та технічний розвиток, а також нестандартні наукові підходи, оригінальне мислення та міжнародна співпраця дозволяють вирішувати складні радіоастрономічні задачі, пов'язані з низькочастотними дослідженнями пульсарів.

Висновки: Наведено історичний огляд понад півсторічних радіоастрономічних досліджень пульсарів, які проводилися та продовжують проводитися в декаметровому діапазоні за допомогою радіотелескопу УТР-2. Висвітлені "старі" та сучасні пріоритети в дослідженнях пульсарів і показано, як якісно змінилися технічні параметри приймально-реєструвальної апаратури та комп'ютерні можливості, які були доступні в минулому, та ті, що використовуються зараз для вивчення природи когерентного радіовипромінювання пульсарів.

Ключові слова: аберация, діапазон частот, імпульс, інтерімпульс, міра дисперсії, міра обертання, плазма, пульсар, радіотелескоп

1. Вступ

Українська історія низькочастотних спостережень пульсарів найімовірніше почалася з повідомлення про відкриття пульсарів, зробленого на традиційному радіоастрономічному семінарі в Інституті радіофізики та електроніки АН УРСР (в Харкові) Семеном Яковичем Брауде після його повернення з союзної Академії наук в 1968 р. Напередодні в журналі Nature була опублікована знаменита стаття Ентоні Г'юїша, Джоселін Белл зі співавторами, присвячена відкриттю пульсарів [1]. У той час інтернету ще не було, новини, в тому числі і наукові, поширювалися по телебаченню, телефону, звичайною поштою та в приватних повідомленнях, і тому до Харкова вони доходили з певним запізненням. Юрій Маркович Брук першим з українських науковців зацікавився дослідженнями пульсарів і вже в грудні

1968 р. розпочав спостереження цих унікальних астрофізичних об'єктів в декаметровому діапазоні. По суті, він став піонером низькочастотних досліджень пульсарів в світовому масштабі. Перші спостереження пульсарів почали проводитися взимку 1968–1969 рр. на антені Захід–Схід радіотелескопа УТР-2 [2, 3]. Антени Північ та Південь цього радіотелескопу тоді ще тільки добудовувалися і не були введені в експлуатацію. Спочатку для проведення спостережень пульсарів в декаметровому діапазоні не було жодних передумов. Більш того, існувала думка, що імпульси пульсарів в декаметровому діапазоні взагалі не будуть зареєстровані через наявність ефекту розсіяння (стала часу розсіяння обернено пропорційна четвертому ступеню частоти спостережень, $\Delta\tau_{sc}(f) \sim 1/f^4$) і великої дисперсійної затримки імпульсів ($\Delta\tau_{dis}(f) \sim 1/f^2$), що виникає при їх поширенні в міжзоряному сере-

довищі. Не було навіть апаратури, за допомогою якої можна було б реєструвати імпульсну компоненту радіовипромінювання пульсарів. Тому розроблялися оригінальні методи, які дозволяли за непрямыми ознаками робити висновки про наявність чи відсутність радіовипромінювання імпульсів пульсарів і отримувати оцінки спектральної щільності потоків імпульсних компонент радіовипромінювання. Як ми зараз бачимо, ці оцінки були завищені, бо для аналізу обирались дані з високим співвідношенням сигнал/шум. Прикладом такої роботи може служити найперша “пульсарна” робота Ю. М. Брука, яка була присвячена дослідженням двох пульсарів CP B0808+74 та CP B1133+16 [4]. Абревіатура “CP” тут означає “Кембриджський пульсар” (в ті часи кожен пульсар ще називали з великої літери назви обсерваторії, в якій він був вперше виявлений). Оригінальність цитованої роботи полягає в наступному. Оскільки приладів, придатних для реєстрації імпульсного радіовипромінювання в радіообсерваторії УТР-2 (тепер ця обсерваторія носить ім’я академіка С. Я. Брауде) на той час ще не було, до реєстрації випромінювання пульсарів був застосований підхід, аналогічний тому, що використовувався при реєстрації дискретних точкових джерел континуального випромінювання. Різниця полягала в тому, що для кожного досліджуваного пульсара був відомий період його обертання T_{PSR} (невідомих пульсарів тоді в декаметровому діапазоні ніхто не шукав). Цей період обов’язково присутній в огинаючій всіх його імпульсів. Тому в початкових дослідженнях пульсарів дослідники намагалися виділити гармоніку огинаючої середнього профілю, яка була зворотня до періоду обертання пульсара. Цю компоненту потім інтегрували з великою сталою часу для підвищення співвідношення сигнал/шум. У цьому сенсі застосування модуляційного режиму для двох половинок антени спільно з використанням двоканального синхронного детектора з синусним та косинусним каналами та з опорною частотою, рівною частоті обертання пульсара, одночасно з використанням квадратичних детекторів і інтеграторів з досить великою (від однієї до трьох хвилин) сталою часу інтегрування давало змогу сильно зменшити некорельовані на обох половинках антени шумові складові. Розглянутий метод відрізнявся від реєстрації джерел континуального випромінювання тільки наявністю

двоканального синхронного детектора. Завдяки його використанню вдавалося зменшити зовнішні шуми, зсунуті щодо синхронізованої гармоніки, на 24 дБ. При такому методі реєстрації про наявність в прийнятому випромінюванні імпульсів пульсара свідчив вихідний відгук, який мав повторювати форму діаграми спрямованості радіотелескопа за потужністю. При цьому самі імпульси або їх середні профілі не реєструвались. Однак, попри відсутність необхідної апаратури та досвіду, романтика досліджень пульсарів, яка тоді безумовно була присутня в усьому світі, дозволяла ставити найамбітніші та навіть нездійсненні на той час завдання.

Одне з таких завдань було пов’язане з можливістю реєстрації імпульсного радіовипромінювання пульсара з Крабоподібної туманності – одного з двох відомих на той час мілісекундних пульсарів (другий відомий тоді мілісекундний пульсар був виявлений австралійськими дослідниками в Південному небі в сузір’ї Вітрил, тому він мав власне ім’я *Vela pulsar*). Приступаючи до вирішення цього завдання Ю. М. Брук ймовірно розумів основні труднощі, що були пов’язані з необхідністю мінімізації впливу розсіяння, необхідністю компенсації частотної дисперсійної затримки імпульсів і необхідністю забезпечення достатнього співвідношення сигнал/шум у вихідних даних. Для вирішення поставленого завдання на базі антени Захід–Схід ще не введеного в експлуатацію радіотелескопа УТР-2 був реалізований модуляційний режим роботи двох її половинок. Використовувався двоканальний прийом сигналів з дещо різним налаштуванням частот синхронних детекторів. Один канал цієї системи призначався для реєстрації сигналів від пульсара. Для цього частота синхронного детектора налаштовувалася на частоту першої (F_1) або другої (F_2) гармоніки огинаючої імпульсів пульсара з Крабоподібної туманності, $F_1 = 1/T_{\text{PSR}} = 30.22$ Гц, $F_2 = 60.44$ Гц (де $T_{\text{PSR}} = 0.03309112$ с – період обертання пульсара). На той час зі спостережень на більш високих частотах було відомо, що у пульсара з Крабоподібної туманності, майже в середині його профілю, є потужний інтерімпульс. Тому під час спостережень частіше використовувалася друга гармоніка огинаючої. Другий приймальний канал використовував синхронне детектування з частотою 75 Гц, яка ніяк не пов’язана зі спек-

тром огинаючої пульсара. Цей канал використовувався для контролю фонового шуму та наявності або відсутності радіозавад. Додатковий третій канал, який об'єднував усю антену Захід–Схід, вимірював повну спектральну щільність потоку радіовипромінювання Крабоподібної туманності разом з пульсаром. В якості приймальних пристроїв використовувалися легендарні професійні радіоприймачі Р-250М, які мали хороший преселектор з вузькою смугою пропускання, ширина якої становила 1 кГц. Для мінімізації впливу дисперсійного розмиття імпульсів і мінімізації їх розширення за рахунок наявності розсіяння додатково використовувалися смугові фільтри зі смугою пропускання 240 Гц. Найімовірніше це були п'єзоелектричні фільтри на поверхневих акустичних хвилях. Система мала внутрішній калібратор, фазовий маніпулятор, два синхронних детектори та інтегратори у якості фільтрів низьких частот. У більшості випадків в каналі реєстрації імпульсного сигналу спостерігався такий же шумовий відгук, як і в каналі реєстрації шуму. Однак в декількох випадках було заявлено про успішну реєстрацію імпульсів пульсара з Крабоподібної туманності [5]. За всіма формальними ознаками це повинно було бути так, хоча вже в той час були опубліковані роботи [6–8], з яких випливало, що стала часу розсіяння імпульсної компоненти пульсара з Крабоподібної туманності в декаметровому діапазоні повинна бути істотно більшою за період обертання цього пульсара. За оцінками авторів процитованих робіт вона могла складати десятки секунд. В цьому разі розроблена методика спостережень не повинна була б приводити до успішного виявлення відгуку імпульсної компоненти, бо вона мала б трансформуватись в континуальний відгук ще на етапі розсіяння, і застосований синхронний детектор не поліпшував би співвідношення сигнал/шум при реєстрації. Дивно, але основний висновок, який полягав у тому, що “беручи до уваги гіпотезу про розширення імпульсу, сам факт того, що можна спостерігати NP 0532 на таких низьких частотах – найважливіший результат даної роботи”, зроблений тоді Ю. М. Бруком, був вірний. І лише десь аж через 30 з лишком років після цієї піонерської роботи міжнародному колективу дослідників, до якого входило два учня Юрія Марковича і кілька колег, з якими він плідно співпрацював, вдалося вперше в світі зареєструвати

гігантські імпульси радіовипромінювання пульсара з Крабоподібної туманності на частоті близькій до 23 МГц [9]. Стала часу розсіяння гігантських імпульсів на цій частоті становила ≈ 3 с.

2. Перші успішні спостереження імпульсного радіовипромінювання пульсарів

Оскільки на початковому етапі досліджень про властивості радіовипромінювання пульсарів на низьких частотах майже нічого не було відомо, харківськими дослідниками було прийнято розумне рішення почати дослідження середніх профілів імпульсів вже відомих на той час пульсарів. Разом з Ю. М. Бруком до групи дослідників пульсарів з 1970 р. належав Борис Юрійович Устименко. Цей невеликий колектив, до якого під час інститутських практик вливалися студенти (одним з них був нинішній академік НАН України Олександр Олександрович Коноваленко), почав створювати апаратуру і програмне забезпечення, придатні для реєстрації середніх профілів пульсарів. Зокрема, був розрахований і сконструйований синтезатор середніх періодів пульсарів (див. рис. 1). Цей синтезатор мав непогану як на ті часи відносну стабільність частоти ($\Delta f/f_0 \sim 10^{-7}$), бо синтез середнього за сеанс спостереження періоду пульсара спирався на частоту термостабільного кварцового генератора. За допомогою цього синтезатора вдавалося знімати відліки імпульсів пульсарів, прив'язуючись дуже точно до фази періодів їх обертання. Оскільки тоді реєструвалися лише продетектовані сигнали, така прив'язка дозволяла синхронно накопичувати огинаючі радіоімпульсів досліджуваних пульсарів в одних і тих самих фазах періодів їх обертання (на одних і тих же довготах обраного для спостережень пульсара). Часова роздільна здатність на початковому етапі досліджень становила якихось 16 відліків на період (трохи пізніше її вдалося поліпшити спочатку до 32, а потім і до 64 відліків на період). Якщо прийняти до уваги, що середній період звичайних пульсарів близький до 1 с, то початкова часова роздільна здатність складала всього 62.5 мс (зараз вона сягає 15 нс).

Перші спостереження пульсарів проводилися з використанням радіоприймачів Р-250М. Радіотелескоп УТР-2 мав у своєму розпорядженні 30 таких приймачів. Ці приймачі мали можливість

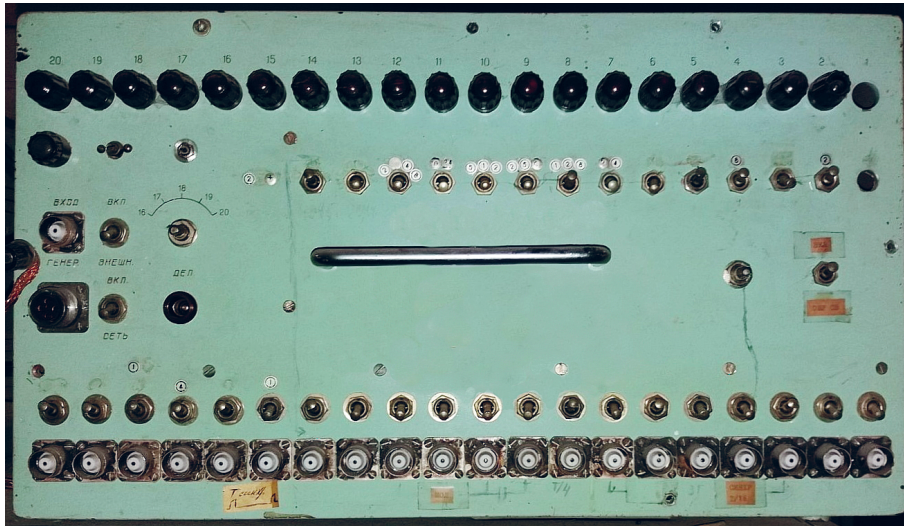


Рис. 1. Синтезатор періодів пульсарів

тільки механічного переналаштування частоти. Проте їх конструкція давала можливість використовувати вузькосмугові фільтри з хорошою вибірковою частотою. Зазвичай смуга фільтрів, які використовувалися для виділення імпульсів пульсарів в декаметровому діапазоні, становила 9 або 14 кГц. Оригінальність первісної методики спостережень пульсарів полягала в тому, що при налаштуванні центральних частот прийому враховувався вплив явища дисперсії. Тобто враховувалась наявність затримки огинаючої більш низькочастотних імпульсів по відношенню до огинаючої високочастотних імпульсів, яка виникає при поширенні радіоімпульсів у міжзоряному просторі. Ця затримка обумовлена різницею в групових (фазових) швидкостях імпульсів пульсарів при їх поширенні в холодній міжзоряній плазмі. Попередній розрахунок центральних частот настройки f_i виконувався так, щоб в кожному більш низькочастотному каналі імпульси конкретного пульсара запізнювалися по відношенню до попереднього каналу на 2 відліки часової роздільної здатності. Розраховувалася також сітка додаткових частот, при переналаштуванні на які каналу з номером i огинаючі імпульсу пульсара зсувалися на величину $\Delta\tau(f_i) = T_{\text{PSR}} + (i-1) \cdot 2T_{\text{PSR}}/N$ (де $\Delta\tau(f_i)$ – часова дисперсійна затримка (зсув) в залежності від частоти f_i ; N – кількість відліків, що реєструється аналого-цифровим перетворювачем в одному частотному каналі за один період обертання пульсара). Такий підхід, з одного боку, дозво-

ляв зсуватися за частотою від можливих радіозавад в каналах реєстрації (для цього нічні техніки за допомогою навушників періодично прослуховували кожен канал і, у разі потреби, уручну переналаштовували його центральну частоту). З іншого боку, такий алгоритм дозволяв програмі реєстрації та первинного аналізу простим зсувом у 2 відліки на канал приводити огинаючі імпульсів спостережуваного пульсара в систему відліку центра мас самого пульсара і вже в ній синхронно накопичувати 100 або 200 його індивідуальних імпульсів. При цьому один кадр, тобто один відлік по всіх каналах, встигав реєструватися істотно швидше, ніж минав інтервал часу між двома послідовними відліками в одному каналі. Недоліки цієї системи реєстрації, які в значній мірі визначалися обмеженими технічними можливостями того часу, теж були очевидні. По-перше, рівень зареєстрованих завад дуже сильно залежав від людського фактора. По-друге, на час спостережень для кожного пульсара повинна розраховуватися своя сітка центральних частот настройки, тому навіть при однаковій еквівалентній смузі реєстрації різних пульсарів, яка в той час становила $30 \cdot 9 = 270$ кГц або $30 \cdot 14 = 420$ кГц, частоти кожного каналу реєстрації (крім хіба що першого) були різні. Приклад ранньої реєстрації імпульсів одного з пульсарів наведено на рис. 2.

Програма реєстрації імпульсів пульсарів теж була досить оригінальною. Вона була написана мовою асемблер (мнемокод), тобто практично в

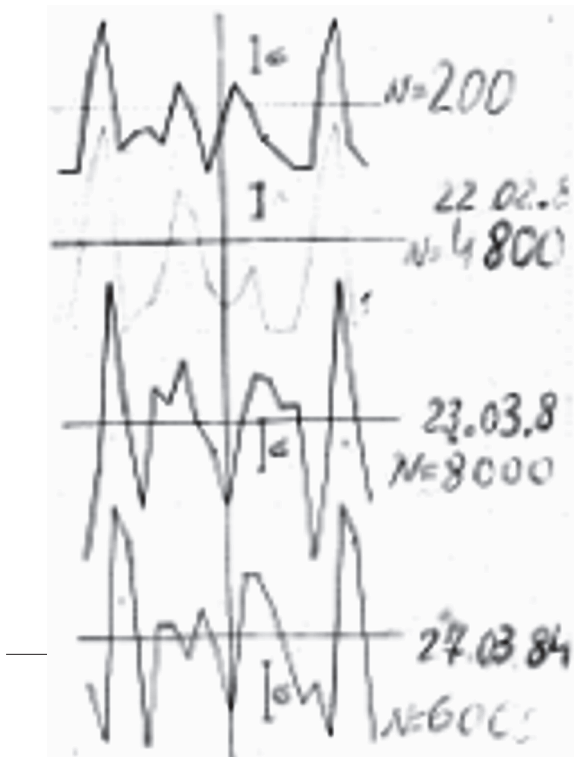


Рис. 2. Типові середні профілі імпульсу пульсара, зареєстровані в різний час при різній кількості накопичень індивідуальних імпульсів $N = 200, 4800, 8000, 6000$

командах процесора, які представлені не в цифрових кодах, а в зручнішій формі, адаптованій до сприйняття програмістом. Для електронно-обчислювальної машини М-6000, яка тоді використовувалася, існувало трохи більше 70 таких команд дуже примітивного рівня. Наприклад, за допомогою команди mov АВ можна було перемістити вміст комірки А в чарунку В. Мистецтво програмування полягало в тому, щоб масиви оперативної пам'яті М-6000 використовувати якомога оптимальніше, відразу ж звільняючи наразі непотрібний простір пам'яті (в сучасному програмуванні такі операції називаються динамічним розподілом оперативної пам'яті). Тодішня програма реєстрації містила елементи боротьби з радіозавадами в реальному часі в наступний спосіб. У проміжному стеку оперативної пам'яті синхронно з періодом обертання пульсара накопичувалося 10 протектованих імпульсів. Потім для всього стека обчислювалося середньоквадратичне відхилення σ_i , і всі відліки стека нормувалися на це значення σ_i . Якщо хоча б один нормований відлік аналізованого стека переви-

щував заданий поріг (поріг зазвичай вибирався на рівні $5\sigma_i \div 7\sigma_i$), увесь стек вважався ураженим імпульсною завадою і виводився в окремий канал, який тоді, на жаль, надалі не аналізувався. У більшості випадків в такому каналі дійсно були присутні завади, але, як з'ясувалося років 20 тому при використанні сучасніших широко-смужових реєстраторів, в $\approx 1\%$ випадків в таких каналах, крім завад, реєструвалися і аномально інтенсивні імпульси пульсарів. Тому виявлення цих дуже інформативних імпульсів запізнилося приблизно на 20 років [10–15]. Накопичені профілі імпульсів з “хороших” і “поганих” каналів виводилися на перфоровану паперову стрічку. Спочатку використовувалася 5-смужова перфорація, а потім (десь з 1981–1982 рр.) – 8-смужова перфорація. Навіть таке, здавалося б, незначне удосконалення при виведенні даних дозволило розширити динамічний діапазон досліджуваних сигналів. Паралельно потік оцифрованих даних виводився спершу на 2- та 4-канальні самописці, а потім на 6-канальний самописець. Самописці заправлялися червоним чорнилом. При цьому слід було регулярно прочищати їх трубчасті пір'їни. Однак свої функції ці самописці виконували справно. Завжди, майже в реальному часі (якщо не враховувати час на накопичення 200 імпульсів), було видно наявність або відсутність зареєстрованих імпульсів пульсарів (див. рис. 3).

При такому способі реєстрації вже не виникало жодних сумнівів у виявленні саме імпульсних компонент радіовипромінювання пульсарів і можна було адекватно оцінювати спектральні щільності потоків та інші параметри зареєстрованих імпульсів. Стало також можливим визначити такий важливий параметр середовища поширення, як міра дисперсії (МД). Перша робота, присвячена дослідженням PSR B0809+74, PSR B1133+16 та PSR B1919+21, була опублікована відразу в журналі Nature Physical Science – одному з найбільш рейтингових журналів в галузі фізики та астрономії [16]. Ю. М. Брук і Б. Ю. Устименко, яких на жаль вже з нами немає, були піонерами низькочастотних досліджень пульсарів не лише в колишньому Радянському Союзі, а й у світі. Для того щоб проводити спостереження імпульсів пульсарів на таких низьких частотах, вони створили унікальний анало-

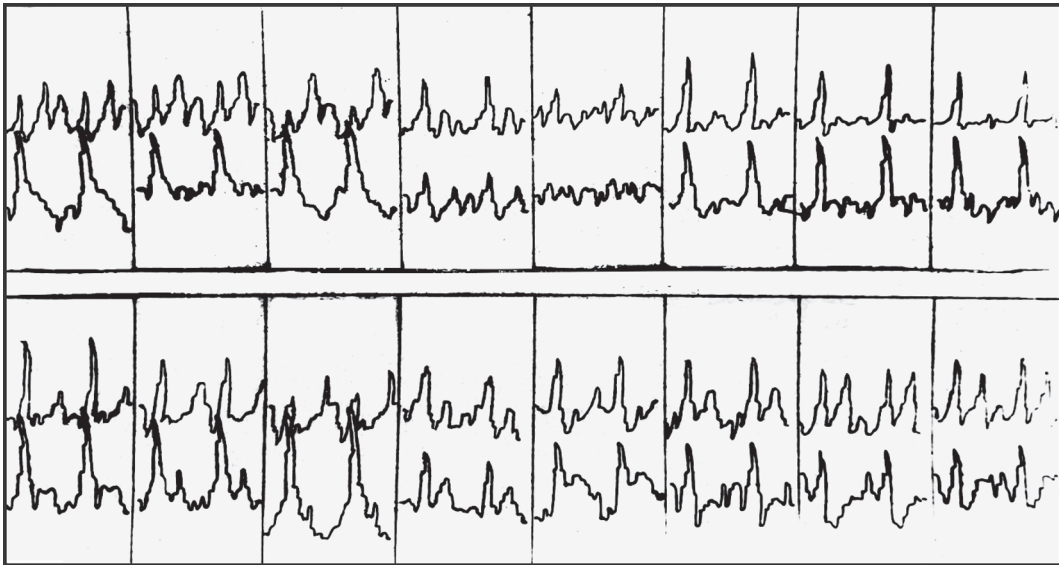


Рис. 3. Середні профілі PSR B0809+74 в різних діапазонах частот, зареєстровані на радіотелескопі УТР-2 за допомогою чорнильного самописця. Уздовж осі абсцис відкладено час, а вздовж осі ординат наведена нормована інтенсивність накопичених імпульсів

го-цифровий пристрій і розробили оригінальні методи проведення спостережень та реєстрації отриманої інформації. До цих оригінальних пристроїв і методів реєстрації відносяться вже згаданий синтезатор періодів пульсарів і реєстрація їх імпульсів з використанням теорії гребінчастого фільтра [17, 18], програма реєстрації з накопиченням імпульсів в реальному часі, яка була написана мовою програмування нижчого рівня – асемблер – та поєднувалася з програмою наведення на пульсари та виводом зареєстрованих імпульсів на самописець, і багато іншого. В той час нестача відповідних технічних складових компенсувалася кмітливістю та оригінальністю рішень цих талановитих дослідників.

3. Основні напрямки ранніх низькочастотних досліджень пульсарів

При дефіциті початкової інформації про радіовипромінювання пульсарів в низькочастотному діапазоні необхідно було сформулювати основні напрямки досліджень. Частково ці напрямки формулювалися під впливом спостережень, які велися в більш високочастотних діапазонах. Так, на початковому етапі світових досліджень пульсарів в високочастотних діапазонах у деяких пульсарів було зареєстровано інтерімпульсне ви-

промінювання. Не дивно, що такі дослідження стали модними. Оскільки було зрозуміло, що в низькочастотному діапазоні кут розкриття вікна основного імпульсу, так само як і вікон інтерімпульсів, буде більшим (ширшим), ніж в високочастотному діапазоні, було прийнято рішення зосередитися на пошуках інтерімпульсів. Незабаром інтерімпульси були виявлені майже у всіх пульсарів, які спостерігалися в декаметровому діапазоні [19, 20]. Хоча таких пульсарів спочатку було всього сім (B0809+74, B0834+06, B0950+08, B1133+16, B1237+25, B1919+21, B2016+28), деякий час вважалося, що наявність інтерімпульсів є загальною властивістю декаметрового радіовипромінювання пульсарів. Подальші спостереження показали, що це був помилковий висновок, який виник через недооцінку впливу завад і високого рівня синхротронного фонового радіовипромінювання Галактики на дані, що реєструються. При цьому тільки у декількох пульсарів інтерімпульсне випромінювання реєструється в стабільній області довгот. У решти пульсарів існують протяжні області радіовипромінювання, яке швидше нагадує континуальне ніж імпульсне.

Другим напрямком досліджень були широко-смугові дослідження спектрів середніх профілів п'яти пульсарів (B0809+74, B0834+06, B0950+08, B1133+16, B1919+21). Для цього був сформований міжнародний колектив дослідників, до скла-

ду якого, крім Ю. М. Брука та Б. Ю. Устименко, увійшли радіоастрономи з Росії, Пушино, (А. Д. Кузьмін, В. М. Малофєєв, Ю. П. Шитов) і Великобританії (J. G. Davies, A. G. Lyne, B. Rowson). Цей колектив за допомогою радіотелескопів УТР-2 на частотах 16.7, 20 і 25 МГц, ДКР-1000 (решітка Захід–Схід) на частоті 61 МГц, БСА-100 на частоті 102.5 МГц і MARK-1 радіообсерваторії Джодрел Бенк на частотах 151, 408 і 1420 МГц досліджував спектри середніх імпульсів пульсарів в діапазоні 16.7÷1420 МГц. Результати цих без перебільшення класичних досліджень викладені в роботі [21]. Незважаючи на те, що спостереження в різних діапазонах не проводилися одночасно, авторам вдалося дуже точно їх поєднати і отримати компіляційні спектри середніх імпульсів в найширшому для того часу діапазоні. Вперше був виявлений максимум спектральної щільності потоку радіовипромінювання п'яти пульсарів поблизу 100 МГц та низькочастотний завал в спектрах всіх досліджених пульсарів. Згодом ці властивості виявилися загальними для всієї популяції пульсарів.

Третій напрямок досліджень було реалізовано дещо пізніше вже з появою спеціалізованих магнітофонів з високою швидкістю запису. Наявність таких пристроїв дозволила виявити

тонку структуру (на високих частотах ця структура отримала назву “мікроструктура”) в декаметровому радіовипромінюванні пульсарів. У 1982 р. на радіотелескопі УТР-2 в діапазоні 25 МГц були проведені спостереження пульсара В0809+74 з безпрецедентною на той час роздільною здатністю в часовій області 100 мкс [22]. Ця робота мала продовження в дослідженнях субімпульсів пульсарів [23] і дослідженнях тонкої структури аномально інтенсивних імпульсів [13, 14]. Як продовження тих перших спостережень тонкої структури радіовипромінювання PSR В0809+74 з'явилась також робота щодо дослідження впливу розсіяння на імпульси пульсарів в декаметровому діапазоні [15].

Ще однією особливістю спостережень того часу була можливість реєстрації двоперіодних середніх профілів імпульсів пульсарів, що дозволяло надійніше реєструвати міжімпульсне випромінювання (див. рис. 4–6). Це випромінювання реєстрували у різних пульсарів, однак проблема полягала в тому, що спостереження пульсарів велися не в суцільній смузі, а в окремих частотних смугах. Тому додаткових надійних критеріїв, наприклад таких, як збіг міри дисперсії на довготах головного імпульса та міжімпульсного випромінювання та/або збіг міри обертання, для ідентифікації міжімпульсного ви-

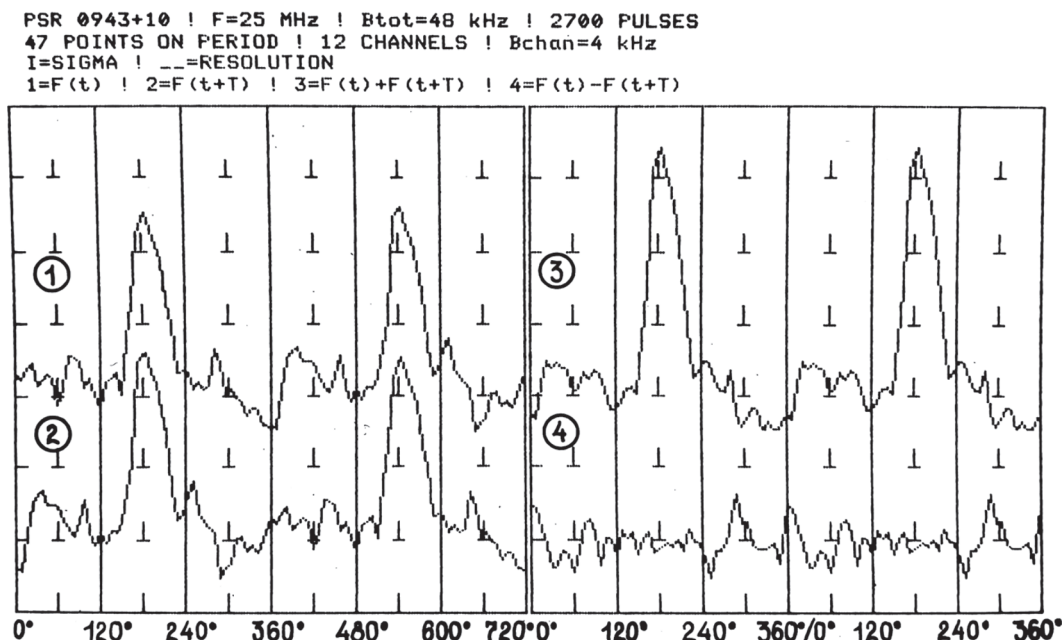


Рис. 4. Реєстрація імпульсного радіовипромінювання PSR В0943+10 на частоті 25 МГц в двоперіодному режимі (панелі 1, 2, 3) та визначення диференційного сигналу (панель 4)

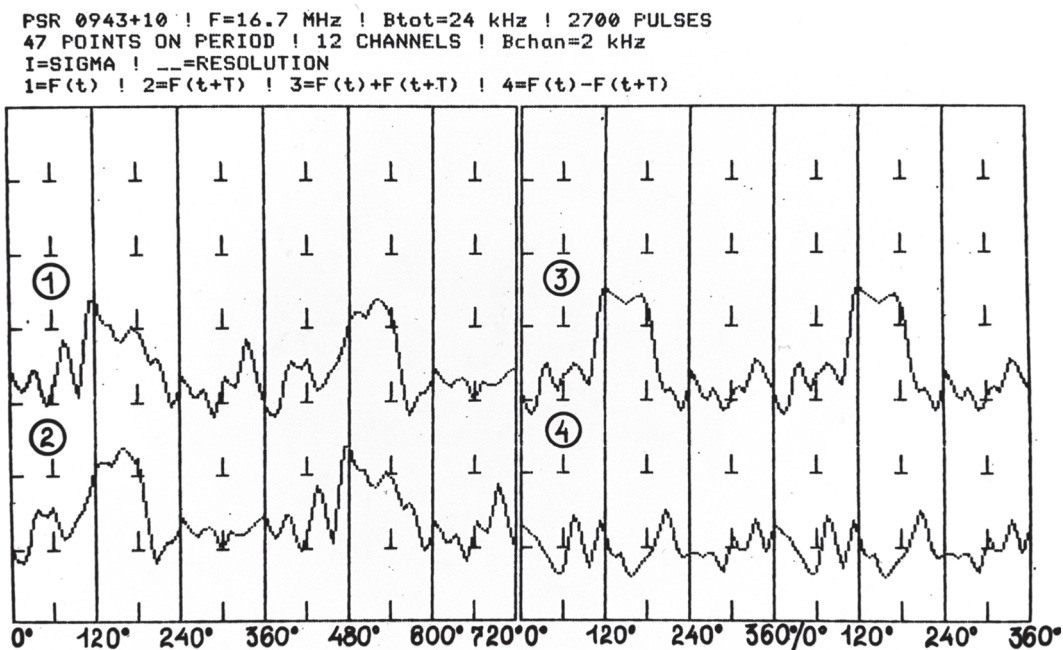


Рис. 5. Реєстрація імпульсного радіовипромінювання PSR B0943+10 на частоті 16.7 МГц в двоперіодному режимі (панелі 1, 2, 3) та визначення диференційного сигналу (панель 4)

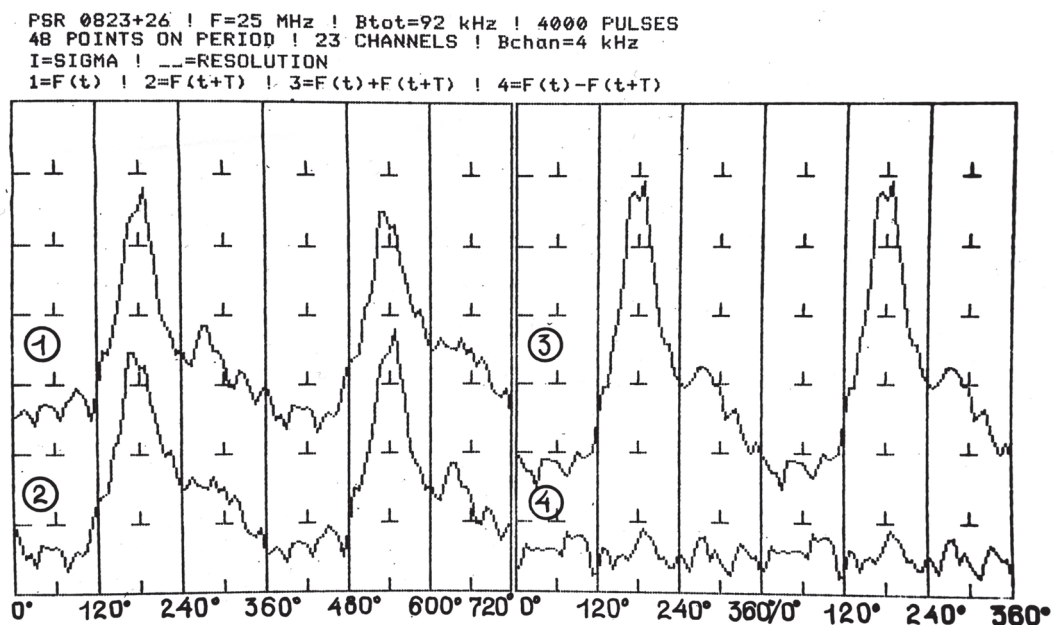


Рис. 6. Реєстрація імпульсного радіовипромінювання PSR B0823+26 на частоті 25 МГц в двоперіодному режимі (панелі 1, 2, 3) та визначення диференційного сигналу (панель 4)

промінювання як пульсарного випромінювання не було. Оскільки міжімпульсне випромінювання було розосереджено в широкій області довгот, не можна було оцінити сталу часу його розсіяння і порівняти її з аналогічною величиною для імпульсів. Отже, при ідентифікації міжімпульсного

радіовипромінювання як пульсарного до уваги бралися тільки його амплітудні характеристики та ймовірність його реєстрації в діапазоні різних довгот пульсара. Тому дослідження міжімпульсного радіовипромінювання пульсарів і в наш час залишається актуальним завданням.

Одним з цікавих завдань, яке вирішувалося на етапі ранніх досліджень пульсарів, було вирішення задачі реєстрації так званого наддисперсійного запізнювання радіовипромінювання пульсарів. Сама ідея ґрунтується на гіпотезі про те, що низькочастотне випромінювання пульсара відривається від його магнітосфери з більш великих висот над його поверхнею, ніж високочастотне. Водночас, силові лінії дипольного магнітного поля внаслідок обертання пульсара та наявності принципу причинності повинні загинатися (скручуватися) проти локального вектора лінійної швидкості $\vec{V}(f)$, який визначається частотою обертання пульсара

$$\vec{V}(f) = \vec{\Omega} \times \vec{r}(f),$$

де $\vec{\Omega}$ – циклічна частота обертання пульсара, $\vec{r}(f)$ – радіус критичної поляризації, f – частота випромінювання.

Крім цього, через ефект віддачі має існувати додаткове скручування силових ліній магнітного поля як його реакція на радіовипромінювання. Тому в системі спостерігача повинно реєструватися надмірне, відносно дисперсійного, запізнювання. Ідею з наявністю додаткового скручування за рахунок ефекту віддачі висловив Юрій Павлович Шитов. Вона викладена в роботах [24–28]. Насправді ситуація дещо складніша [29]. Разом зі збуреннями магнітного поля та пов'язаним з ними запізненням існує так зване ретардаційне запізнювання й абераційне випередження низькочастотних компонент випромінювання відносно високочастотних. Обидві останні складові часового/кутового запізнювання/випередження залежать від системи відліку, в якій вони реєструються або обчислюються. В системі спостерігача ці складові враховуються з протилежними знаками відносно наддисперсійного запізнювання. У 1987 р. Аркадій Дмитрович Кузьмін, який тоді був директором Пушчинської радіоастрономічної обсерваторії АКЦ ФІАН ім. П. Н. Лебедева (тут використана нинішня назва ПРАО), запропонував перевірити ідеї Ю. П. Шитова з використанням радіотелескопів БСА-100, ДКР-1000 (плече Захід–Схід) і УТР-2. Учасниками тих подій були А. Д. Кузьмін, Ю. П. Шитов, В. М. Малофєєв, Ю. М. Брук і автор цієї статті. Для перевірки висловленої ідеї необхідно було провести одночас-

ні спостереження імпульсів пульсара на трьох різних радіотелескопах в декількох діапазонах частот. Як об'єкт досліджень був обраний добре відомий пульсар В0809+74. Результати спостережень повинні були бути прив'язані до єдиного джерела часу. Складність полягала в тому, що Пушчинська обсерваторія мала власну службу часу, а радіотелескоп УТР-2 на той час такої служби не мав. У цій ситуації прив'язка за часом всіх спостережень здійснювалася наступним чином.

1. Шість з тридцяти приймачів радіотелескопа УТР-2 були оснащені додатковими преселекторами, які працювали в діапазоні 30 МГц. Отже, у радіотелескопів ДКР-1000 і УТР-2 з'явилася одна спільна частота (30 МГц). На цій частоті вже самі імпульси пульсара (з деякою корекцією) служили хорошою прив'язкою за часом.

2. Для того щоб використовувати діапазон 30 МГц, слід було частково модернізувати систему підсилення УТР-2, яка на той час не мала підсилювачів у цій смузі частот. Але увесь радіотелескоп за короткий термін обладнати відповідними підсилювачами було неможливо. Тоді було прийнято рішення виокремити з усього радіотелескопу найближчу до його фазового центру половинку 4-ї секції антени Північ (всього 90 диполів з 2040 диполів, що входять до складу УТР-2) та укомплектувати її відповідним підсилювачем. За допомогою окремого радіочастотного кабелю прийняті нею сигнали подавалися на шість приймачів, що мали новий діапазон 30 МГц. Далі ці сигнали надходили в звичайну 30-каналну систему реєстрації.

3. Для надійнішого контролю часової прив'язки (оскільки бракувало впевненості у тому, що половинка секції УТР-2 зможе зареєструвати імпульси пульсара на частоті 30 МГц з високим співвідношенням сигнал/шум) секундні сигнали короткохвильових радіостанцій точного часу РВМ приймалися та виводилися в один з каналів двоканального високошвидкісного самописця. В інший канал цього ж самописця виводилися протектовані імпульси пульсара В0809+74.

Так досягалася точність часової прив'язки ± 4 мс. Для даних, що записувалися з часою роздільною здатністю ≈ 20 мс, такої точності було цілком достатньо (зауважимо, що наразі стандартний мережевий протокол NTP забезпечує точність синхронізації комп'ютерного часу ± 100 мс). 20 січня 1987 р. заплановані спо-

стереження були проведені одночасно в обох радіообсерваторіях. На всіх радіотелескопах з хорошою прив'язкою за часом були отримані досить якісні дані в діапазоні частот від 16.437 до 102.746 МГц. Під час спостережень навіть на половинці секції радіотелескопа УТР-2 були зареєстровані середні профілі пульсара В0809+74 на частоті 30 МГц зі співвідношенням сигнал/шум близько 7. Однак під час інтерпретації отриманих даних думки учасників тих спостережень розійшлися і досить цікава робота так і не була опублікована, про що доводиться тільки шкодувати. Хоча можна було б навести обидві точки зору в спільній роботі. Проблема інтерпретації даних, отриманих на різних радіотелескопах в окремих спектральних смугах, полягає в тому, які точки на середніх профілях пульсарів (по суті які довготи на поверхні пульсара) вважати реперними для визначення “істинної” міри дисперсії та, відповідно, які точки слід обрати для визначення наддисперсійного запізнювання. Друга проблема, яка тісно переплітається з першою, полягає в зміні форми середнього профілю залежно від частоти. У PSR В0809+74 середній профіль імпульсу розширюється зі зниженням частоти на тлі загального зменшення інтенсивності спектра імпульсної компоненти. Причому передня (ліва) компонента імпульсу зменшує свою відносну інтенсивність швидше, ніж задня (права) компонента. Отже, в середині імпульсу існує локальний мінімум, інтенсивність якого зменшується до нижніх частот. Для визначення наявності або відсутності ефекту наддисперсійного запізнювання потрібно спочатку визначити реперну (базову) точку на середньому профілі імпульсу, для якої вимірюється міра дисперсії, та діапазон частот, в якому визначається значення міри дисперсії. Далі потрібно оцінити кут розкриття неспотвореної дипольної (в першому наближенні) складової магнітного поля залежно від частоти. Потім слід оцінити так званий ефект ретардації (запізнювання при поширенні) верхніх частот відносно низьких в умовах електрон-позитронної плазми магнітосфери пульсара. Крім цього, треба розуміти, чи одночасно випромінювання пульсара в системі спостерігача відривається від магнітосфери на різних частотах, чи цей процес відбувається послідовно, наприклад, внаслідок руху згустків зарядів, аналогічно тому, як це від-

бувається в короні Сонця. Слід також завдати (наприклад, параметрично) кут між віссю обертання та магнітним моментом на поверхні пульсара і після цього “закрутити” побудовану модель щодо осі обертання та врахувати ефект аберації, про який йшлося вище. Напевно ще слід врахувати можливу наявність ефекту двопробеневого заломлення для звичайної та незвичайної хвиль в магнітосфері пульсара. Врахувавши все це, можна приступати до інтерпретації даних спостережень.

У автора зберігся лише один рисунок, ілюструючий фрагменти отриманих тоді даних (див. рис. 7, а). Аналогічні результати (див. рис. 7, б) були отримані зі спостережень цього ж пульсара раніше (06.02.1982 р.) безвідносно досліджень ефекту наддисперсійного запізнювання. Цікаво порівняти кутову відстань між точками А і В, які відповідають локальному мінімуму та правому максимуму середнього профілю пульсара В0809+74, з урахуванням його морфологічних змін з частотою. Набір кутових відстаней, отриманий з наших даних, і аналогічний набір, оцінений з даних, наведених в роботі [30], показано на рис. 8. Значення часових інтервалів між реперними (базовими) точками (див. рис. 7) були перераховані в значення спостережуваних на промені зору кутів. Вони наведені на рис. 8.

Аналізуючи рис. 7 і рис. 8, можна бачити, що значення міри дисперсії на промені зору для різних фазових точок середнього профілю різняться. За нашими даними, середнє значення міри дисперсії та її середньоквадратичне відхилення для точки А складають $MD_{AV_A} = 5.74680$ пк/см³ і $\sigma_{MDA} = 0.000874$ пк/см³, для точки В – $MD_{AV_B} = 5.75491$ пк/см³ і $\sigma_{MDB} = 0.004253$ пк/см³ відповідно. Причому різниця середніх значень спостережуваної міри дисперсії перевищує сучасну точність спостережень. Отже, при вирішенні завдань, що вимагають високої точності часової прив'язки, слід переходити від статичних до динамічних характеристик середовища поширення. Самі ж дослідження ефекту наддисперсійного запізнювання повинні виконуватися з урахуванням не тільки аналізу середніх профілів, але й з залученням даних про поляризацію субімпульсної та тонкої структури радіовипромінювання пульсарів. Розуміння цього прийшло значно пізніше,

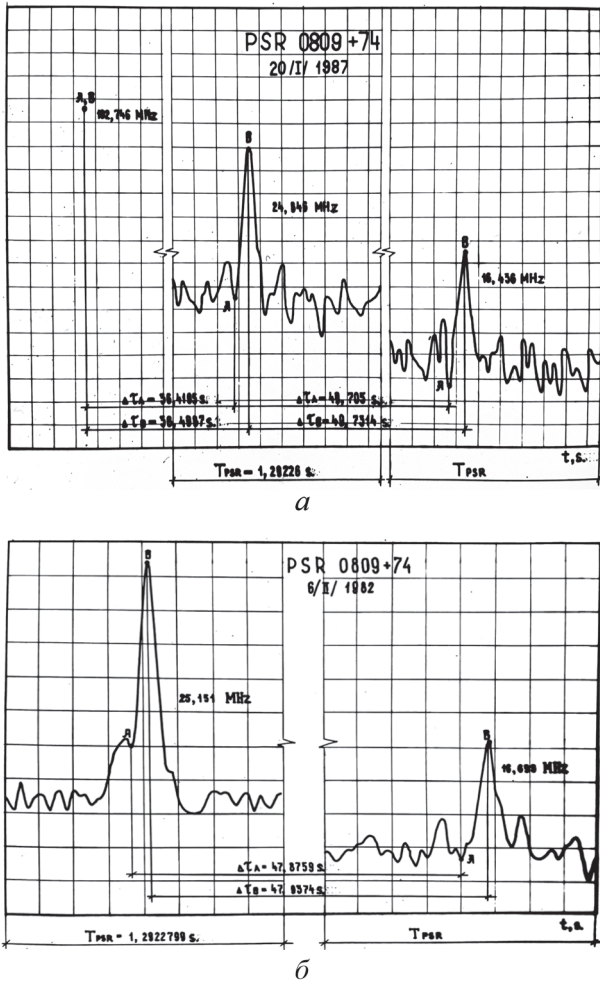


Рис. 7. Взаємне розташування середніх профілів імпульсів пульсара B0809+74 на різних частотах в системі відліку спостерігача та виміряні часові інтервали між реперними точками середніх профілів: а – спостереження 20.01.1987 р., б – спостереження 06.02.1982 р.

ніж були проведені згадані спостереження. Але, безумовно, ці спостереження наблизили нас до цього розуміння.

4. Аналогія між декаметровим радіовипромінюванням пульсарів та радіовипромінюванням Юпітера

Оригінальність мислення науковців, що брали участь у початкових дослідженнях пульсарів, проявлялась у тому, що шукались аналогії між специфікою низькочастотного радіовипромінювання пульсарів та радіовипромінюванням інших астрофізичних об'єктів. Одним з таких об'єктів була планета Юпітер зі супутником Іо. Як відомо, між цими об'єктами існує магнітна трубка, в якій присутнє магнітне поле з великим значенням напруженості магнітного поля та наявністю електричних струмів і намагніченої плазми [31–33]. В 1980 р. С. Я. Брауде та Ю. М. Брук опублікували наукову статтю [34], в якій була проаналізована аналогія між декаметровим радіовипромінюванням пульсарів та Юпітера. Основна ідея статті полягала в тому, що геометрія випромінювання пульсарів та радіоштормів Юпітера має багато спільних рис. По-перше, осі обертання в обох випадках зсунуті відносно променя випромінювання. По-друге, радіовипромінювання пульсарів та Юпітера генерується за наявності сильних магнітних полів, розташованих в намагніченій плазмі (для пульсарів – це електрон-позитронна плазма, а для магнітної трубки Юпітер-Іо – це іон-електронна плазма). По-третє, для обох

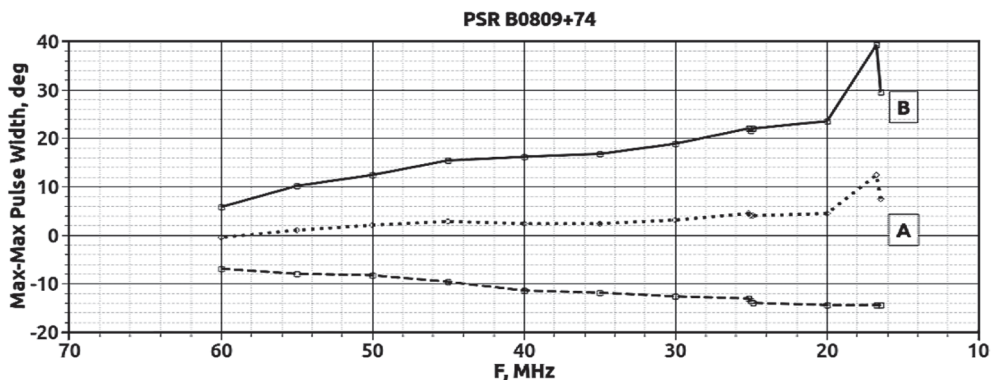


Рис. 8. Залежність ширини середнього профілю пульсара B0809+74 на різних частотах, оцінена між максимумами його лівої та правої компонент (реперна точка А відповідає нульовому зсуву на кожній частоті): штрихова лінія – кутовий зсув лівого максимуму середнього профілю відносно точки А, суцільна лінія – кутовий зсув правого максимуму (точка В) середнього профілю відносно точки А, пунктирна лінія – розраховане положення половини кутової відстані між лівим і правим максимумами

об'єктів спостерігається імпульсний характер радіовипромінювання. Сьогодні до цього можна додати, що радіовипромінювання обох доволі різних космічних об'єктів має внутрішню тонку структуру та високий ступінь лінійної поляризації. Тож основна ідея проведеної С. Я. Брауде та Ю. М. Бруком аналогії полягала в тому, що вивчення більш близької, ніж пульсари, планети Юпітер, яка генерує потужні радіоштурми з радіовипромінюванням, подібним до пульсарного, дозволить швидше наблизитись до розуміння когерентної природи радіовипромінювання пульсарів.

5. Найбільш значні досягнення в дослідженнях пульсарів

Крім дослідження пульсарів, Ю. М. Брук активно займався розробкою підсилювачів з низьким рівнем власних шумів та з високим динамічним діапазоном по співвідношенню до рівнів завад другого та третього порядків [35–37]. Завдяки йому та колективу його однодумців, який працював уже в складі Радіоастрономічного інституту НАН України, вдалося здійснити модернізацію радіотелескопа УТР-2 і перетворити його з вузькосмугового інструмента в широкосмуговий, що відразу ж додало новий імпульс всім програмам спостережень, які проводилися на радіотелескопі. Це був той класичний випадок, коли кількісні зміни – розширення смуги спостережень і перехід від окремих частотних діапазонів до суцільної смуги спостережень – привели до появи нових якостей у радіотелескопа УТР-2. Зокрема, в дослідженнях пульсарів модернізація УТР-2 зробила можливим виявити і дослідити субімпульсну структуру їх радіовипромінювання [23], аномально-інтенсивні імпульси у кількох пульсарів [10, 11], тонку структуру аномально-інтенсивних імпульсів [13], поляризацію випромінювання найближчих до Землі пульсарів [38, 39], гігантські імпульси пульсара в Крабоподібній туманності [9], дослідити закономірності розсіяння радіовипромінювання імпульсів пульсарів [15], редетектувати 40 нових для декаметрового діапазону пульсарів і уточнити їх міри дисперсії [40], виявити багато джерел транзйентного радіовипромінювання [41–43], розробити методи дослідження швидких варіацій міри дисперсії та міри обертання та навчитися визначати знак

міри обертання у спостереженнях з використанням диполів, які рееструють тільки одну лінійну поляризацію радіовипромінювання [13]. Спостереження пульсарів стали вестися в суцільному спектрі на зовсім іншому якісному рівні з високою часовою та/або частотною роздільною здатністю [44–46]. Зрозуміло, що, крім пульсарів, на радіотелескопі УТР-2 спостерігалися й інші джерела радіовипромінювання. Історія 50-річних спостережень всіх астрофізичних об'єктів, яка нерозривно пов'язана з постійним процесом модернізації УТР-2, докладно викладена в роботі [47].

6. Висновки

Початковий період дослідження пульсарів в декаметровому діапазоні окреслив коло завдань, декотрі з яких були успішно вирішені з використанням радіотелескопа УТР-2 на зорі дослідження пульсарів. Попри те, що низка завдань, поставлених в той період, не могла бути вирішена наявними тоді засобами прийому, реєстрації та аналізу, сама їх постановка сприяла модернізації цих засобів і методів аналізу. Внаслідок цього впродовж 50 років відбувалася безперервна модернізація приймального та реєструвального устаткування радіотелескопа УТР-2 і радіотелескопів інтерферометричної мережі УРАН [48]. Згодом це привело до вирішення більшої частини завдань, сформульованих в самий ранній період дослідження пульсарів.

Що ще важливіше, вже з кінця 70-х рр. минулого століття радіотелескоп УТР-2 став частиною світової радіоастрономічної мережі та набув широкого міжнародного визнання. Наразі наш радіотелескоп успішно працює з міжнародними низькочастотними радіотелескопами ILT, NenuFAR та іншими. УТР-2 бере також участь в підтримці низки космічних місій. Існує навіть проєкт розгортання низькочастотного радіотелескопа на зворотньому боці Місяця [49, 50].

Завдяки низькочастотним дослідженням пульсарів народилися нові наукові напрямки, пов'язані з дослідженнями планетарної грозової активності [51, 52] та транзйентів (імпульсних джерел радіовипромінювання невідомої поки що природи) [53].

Ось уже третє покоління дослідників успішно займається низькочастотними спостереженнями пульсарів на радіотелескопі УТР-2. Сьогодні вже

можна говорити про створення української школи низькочастотних досліджень пульсарів. Напевно це і є головний підсумок піонерських досліджень пульсарів, розпочатих понад півстоліття тому.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Hewish A., Bell S. J., Pilkington J. D. H., Scott P. F., and Collins R. A. Observation of a rapidly pulsating radio source. *Nature*. 1968. Vol. 217, No. 5130. P. 709–713. DOI: 10.1038/217709a0
- Брауде С. Я., Мень А. В., Содин Л. Г. Радиотелескоп декаметрового діапазона волн УТР-2. *Антенны*. Москва: Связь, 1978. Вып. 26. С. 3–14.
- Мень А. В., Содин Л. Г., Шарыкин Н. К., Брук Ю. М., Мельяновский П. А., Инютин Г. А., Гончаров Н. Ю. Принципы построения и характеристики антенн радиотелескопа УТР-2. *Антенны*. Москва: Связь, 1978. Вып. 26. С. 15–57.
- Bruck Yu. M. Estimates of radio emission intensity of pulsars CP 0808 and CP 1133 at 25 MHz frequency. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Radiofiz.* 1970. Vol. 13, No. 12. P. 1814–1817. (in Russian).
- Bruck Yu. M. Observation of the Radio Emission of the Pulsar NP 0532 at the Frequency 25 MHz. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Radiofiz.* 1970. Vol. 13, No. 12. P. 1818–1826, (in Russian).
- Comella J. M., Craft H. D., Lovelace R. V. E., Sutton J. M., and Tyler G. L. Crab Nebula Pulsar NP0532. *Nature*. 1969. Vol. 221. P. 453–454. DOI: 10.1038/221453a0
- Code A. D. The Possible Effects of Scattering of Pulsar Radiation. *Astrophys. J.* 1970. Vol. 159. P. L29–L34.
- Staelin D. H. and Sutton J. M. Observed Shapes of Crab Nebula Radio Pulses. *Nature*. 1970. Vol. 226. P. 69–70. DOI: 10.1038/226069a0
- Popov M. V., Kuz'min A. D., Ul'yanov O. M., Deshpande A. A., Ershov A. A., Zakharenko V. V., Kondrat'ev V. I., Kostyuk S. V., Losovskii B. Ya., and Soglasnov V. A. Instantaneous Radio Spectra of Giant Pulses from the Crab Pulsar from Decimeter to Decameter Wavelengths. *Astron. Rep.* 2006. Vol. 50, Is. 7. P. 562–568. DOI: 10.1134/S1063772906070067
- Ульянов О. М., Захаренко В. В., Коноваленко А. А., Лекашо А., Розолен К., Рукер Х. О. Обнаружение индивидуальных импульсов пульсаров B0809+74; B0834+06; B0943+10; B0950+08; B1133+16 в декаметровом диапазоне волн. *Радиофізика і радіоастрономія*. 2006. Т. 11, № 2. С. 113–133.
- Ульянов О. М., Дешпандре А., Захаренко В. В., Асрескар А., Шанкар У. Двухчастотные наблюдения шести пульсаров с использованием УТР-2 и GEETEE радиотелескопов. *Радиофізика і радіоастрономія*. 2007. Т. 12, № 1. С. 5–20.
- Ul'yanov O. M. and Zakharenko V. V. Energy of anomalously intense pulsar pulses at decameter wavelengths. *Astron. Rep.* 2012. Vol. 56, Is. 6. P. 417–429. DOI: 10.1134/S1063772912060054
- Ulyanov O. M., Skoryk A. O., Shevtsova A. I., Plakhov M. S., and Ulyanova O. O. Detection of the Fine Structure of the Pulsar J0953+0755 Radio Emission in the Decametre Wave Range. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2016. Vol. 455, Is. 1. P. 150–157. DOI: 10.1093/mnras/stv2172
- Скорик А. А., Ульянов О. М., Захаренко В. В., Шевцова А. И., Васильева Я. Ю., Плахов М. С., Кравцов И. П. Тонкая структура аномально интенсивных импульсов пульсара J0814+7429 в декаметровом диапазоне. *Радиофізика і радіоастрономія*. 2017. Т. 22, № 2. С. 93–111. DOI: 10.15407/rpra22.02.093.
- Ulyanov O. M., Shevtsova A. I., Zakharenko V. V., Skoryk A. O., Vasylieva I. Y., and Plakhov M. S. Time and Polarization Radiation Characteristics of PSR J0242+6256 at the Decameter Wavelength Range. *Kinemat. Phys. Celest. Bodies*. 2018. Vol. 34, No. 4. P. 174–183. DOI: 10.3103/S0884591318040062
- Bruck Yu. M. and Ustimenko B. Yu. Decametric Pulse Radioemission from PSR 0809, PSR 1133, and PSR 1919. *Nat. Phys. Sci.* 1973. Vol. 242, Is. 117. P. 58–59. DOI: 10.1038/physci242058a0
- Bruck Yu. M. and Ustimenko B. Yu. Methods and apparatus for observation of pulsars in the decameter wavelength range. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Radiofiz.* 1973. Vol. 16. P. 1867–1870. (in Russian).
- Bruck Yu. M. and Ustimenko B. Yu. Procedure and Equipment for Observation of Pulsars in the Decameter Range of Wavelengths. *Radiophys. Quantum Electron.* 1973. Vol. 16, Is. 12. P. 1450–1452. DOI: 10.1007/BF01037043
- Bruck Yu. M. and Ustimenko B. Yu. The Interpulse Radio Emission of the Pulsar PSR 191+21 at the Frequencies 16.7–38 MHz. *Astrophys. Space Sci.* 1977. Vol. 51. P. 225–227. DOI: 10.1007/BF00642474
- Bruck Yu. M. and Ustimenko B. Yu. The Interpulse Emission Structure in Pulsars. *Astron. Astrophys.* 1979. Vol. 80. P. 170–173.
- Bruck Yu. M., Davies J. G., Kuz'min A. D., Lyne A. G., Malofeev V. M., Rowson B., Ustimenko B. Yu., and Shitov Yu. P. Radio-emission spectra of five pulsars in the 17–1420 MHz range. *Sov. Astron.* 1978. Vol. 22. P. 588–593.
- Novikov A. Yu., Popov M. V., Soglasnov V. A., Bruck Yu. M., and Ustimenko B. Yu. Observations of pulsar PSR 0809+74 at a frequency of 25 MHz with a time resolution of 100 μ sec. *Sov. Astron.* 1984. Vol. 28, Is. 2. P. 199–201.
- Ul'yanov O. M., Zakharenko V. V., and Bruck Yu. M. The parameters of pulsar subpulse emission at decameter wavelengths. *Astron. Rep.* 2008. Vol. 52, Is. 11. P. 917–924. DOI: 10.1134/S1063772908110061
- Shitov Yu. P. Period dependence of the spectrum and the phenomenon of twisting of the magnetic fields of pulsars. *Sov. Astron.* 1983. Vol. 27, Is. 3. P. 314–321.
- Davies J. G., Lyne A. G., Smith F. G., Izvekova V. A., Kuzmin A. D., and Shitov Yu. P. The magnetic field structure of PSR 0809+74. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 1984. Vol. 211, Is. 1. P. 57–68. DOI: 10.1093/mnras/211.1.57
- Shitov Yu. P. Pulsar radio polarization and the magnetic-field twist effect. *Sov. Astron.* 1985. Vol. 29, Is. 1. P. 33–39.
- Shitov Yu. P. and Malofeev V. M. A superdispersion delay of the meter-wave pulses of PSR 0809+74. *Sov. Astron. Lett.* 1985. Vol. 11, Is. 1. P. 39–42.
- Shitov Yu. P., Malofeev V. M., and Izvekova V. A. Superdispersion delay of low-frequency pulsar pulses. *Sov. Astron. Lett.* 1988. Vol. 14, Is. 3. P. 181–185.

29. Ульянов О. М. Эффекты аберації, ретардації і скручування при спостереженні радіовипромінювання пульсарів. *Кінематика і фізика небесних тіл*. 1990. Т. 6, № 4. С. 63–67.
30. Kondratiev V. New results from LOFAR. In: J. van Leeuwen, ed. *Neutron Stars and Pulsars: Challenges and Opportunities after 80 years. Proceedings IAU, Vol. 8, Symposium No. 291*. 2012. P. 47–52. DOI: 10.1017/S1743921312023125
31. Рябов Б. П., Герасимова Н. Н. *Декаметровое спорадическое радиоизлучение Юпитера*. Киев: Наукова Думка, 1990. 236 с.
32. Боев А. Г., Лукьянов М. Ю. К теории черенковского излучения плазменных волн зарядом, движущимся в магнитоактивной плазме. *Украинский физический журнал*. 1989. Т. 34, № 4. С. 554–558.
33. Boev A. G. and Luk'yanov M. Yu. Mechanism of the decametric S-emission of Jupiter. *Dopovidi Akademii Nauk Ukrain's'koi RSR. Ser. A*. 1990. P. 52–55. (in Ukrainian).
34. Braude S. Ya. and Bruck Yu. M. The analogy between the decameter radio emission of pulsars and that of Jupiter. *Sov. Astron. Lett.* 1980. Vol. 6, Is. 3. P. 166–168.
35. Bruck Yu. M. and Zakharenko V. V. Broad-Band Compensation for Dynamic-Range Measurements by Intermodulation. *Instrum. Exp. Tech.* 1993. Vol. 36. P. 557–562.
36. Абранин Э. П., Брук Ю. М., Захаренко В. В., Коноваленко А. А. Структура и параметры новой системы антенного усиления радиотелескопа УТР-2. *Радиофізика і радіоастрономія*. 1997. Т. 2, № 1. С. 95–102.
37. Abranin E. P., Bruck Yu. M., Zakharenko V. V., and Konovalenko A. A. The New Preamplification System for the UTR-2 Radio Telescope. *Exp. Astron.* 2001. Vol. 11. P. 85–112. DOI: 10.1023/A:1011109128284
38. Ulyanov O. M., Shevtsova A. I., Mukha D. V., and Seredkina A. A. Investigation of the Earth Ionosphere Using the Radio Emission of Pulsars. *Baltic Astron.* 2013. Vol. 22. P. 53–65.
39. Ульянов О. М., Шевцова А. И., Скорик А. О. Поляризационное зондирование магнитосферы пульсаров. *Известия Крымской астрофизической обсерватории*. 2013. Т. 109, № 4. С. 159–168.
40. Zakharenko V. V., Vasylieva I. Y., Konovalenko A. A., Ulyanov O. M., Serylak M., Zarka P., Griefmeier J.-M., Cognard I., and Nikolaenko V. S. Detection of decametre-wavelength pulsed radio emission of 40 known pulsars. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2013. Vol. 431, Is. 4. P. 3624–3641. DOI: 10.1093/mnras/stt470
41. Vasylieva I. Y., Zakharenko V. V., Konovalenko A. A., Zarka P., Ulyanov O. M., Shevtsova A. I., and Skoryk A. O. Decameter pulsar/transient survey of Northern sky. First results. *Radio Phys. Radio Astron.* 2014. Vol. 19, No. 3. P. 197–205. DOI: 10.15407/rpra19.03.197
42. Zakharenko V. V., Kravtsov I. P., Vasylieva I. Y., Mykhailova S. S., Ulyanov O. M., Shevtsova A. I., Skoryk A. O., Zarka P., and Konovalenko O. O. Decameter Pulsars and Transients Survey of the Northern Sky. Status, First Results, Multiparametric Pipeline for Candidate Selection. *Odessa Astronomical Publications*. 2015. Vol. 28, No. 2. P. 252–255. DOI: 10.18524/1810-4215.2015.28.71047
43. Kravtsov I. P., Zakharenko V. V., Vasylieva I. Y., Mykhailova S. S., Ulyanov O. M., Shevtsova A. I., and Skoryk A. O. Parameters of the transient signals detected in the decameter survey of the Northern sky. *Odessa Astronomical Publications*. 2016. Vol. 29. P. 179–183. DOI: 10.18524/1810-4215.2016.29.85210
44. Zakharenko V. V., Nikolaenko V. S., Ulyanov O. M., and Motiyenko R. A. A waveform receiver for continuous registration of fast processes in pulsar radio emission. In: *2007 International Kharkov Symposium Physics and Engrg. of Millimeter and Sub-Millimeter Waves (MSMW)*. 2007. Vol. 2. P. 745–747. DOI: 10.1109/MSMW.2007.4294800
45. Захаренко В. В., Николаенко В. С., Ульянов О. М., Мотиенко Р. А. Приемник с высоким временным разрешением для исследования радиоизлучения. *Радиофізика і радіоастрономія*. 2007. Т. 12, № 3. С. 233–241.
46. Zakharenko V., Konovalenko A., Zarka P., Ulyanov O., Sidorchuk M., Stepkin S., Koliadin V., Kalinichenko N., Stanislavsky A., Dorovsky 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., Vasyukivskiy 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., Koshovyv V., Lozinsky A., Ivantyshyn O., Rucker H. O., Panchenko M., Fischer G., Lecacheux A., Denis L., Coffre A., and Griefmeier J.-M. Digital Receivers for Low-Frequency Radio Telescopes UTR-2, URAN, GURT. *J. Astron. Instrum.* 2016. Vol. 5, No. 4. id. 1641010. DOI: 10.1142/S2251171716410105
47. Коноваленко О. О., Захаренко В. В., Литвиненко Л. М., Ульянов О. М., Сидорчук М. А., Стьопкін С. В., Шепелев В. О., Зарка Ф., Руцер Г. О., Лекашо А., Панченко М., Брук Ю. М., Токарський П. Л., Бубнов І. М., Єрін С. М., Колядін В. Л., Мельник В. М., Калініченко М. М., Станіславський О. О., Доровський В. В., Христенко О. Д., Шевченко В. В., Белов О. С., Грідін А. О., Антонов О. В., Бовкун В. П., Резніченко О. М., Борцов В. М., Квасов Г. В., Остапченко Л. М., Шевчук М. В., Шевченко В. А., Яцків Я. С., Вавілова І. Б., Брауде І. С., Шкуратов Ю. Г., Рябов В. Б., Підгорний Г. І., Тимошевський А. Г., Литвиненко О. О., Галанін В. В., Рябов М. І., Браженко А. І., Ващишин Р. В., Французенко А. В., Кошовий В. В., Івантишин О. Л., Лозінський А. Б., Харченко Б. С., Васильєва Я. Ю., Кравцов І. П., Васильківський С. В., Литвиненко Г. В., Муха Д. В., Василенко Н. В., Шевцова А. І., Мірошніченко А. П., Кугай Н. Н., Соболев Я. М., Цвик Н. О. Засновнику декаметрової радіоастрономії в Україні академіку НАН України Семену Яковичу Брауде 110 років: Історія створення та розвитку вітчизняної експериментальної бази впродовж останнього півстоліття. *Радиофізика і радіоастрономія*. 2021. Т. 26, № 1. С. 5–73. DOI: 10.15407/rpra26.01.005
48. Brazhenko A. I., Bulatsen V. G., Vashchishin R. V., Frantsuzenko A. V., Konovalenko A. A., Falkovich I. S., Abranin E. P., Ulyanov O. M., Zakharenko V. V., Lecacheux A., and Rucker H. New Decameter Radiopolarimeter URAN-2. *Кінематика і фізика небесних тел*. 2005. Т. 21, № 5 (додаток). С. 43–46.
49. Шкуратов Ю. Г., Коноваленко О. О., Захаренко В. В., Станіславський О. О., Баннікова О. Ю., Кайдаш В. Г., Станкевич Д. Г., Корохін В. В., Ваврів Д. М., Галушко В. Г., Єрін С. М., Бубнов І. М., Токарський П. Л., Ульянов О. М.,

- Степкін С. В., Литвиненко Л. М., Яцків Я. С., Вайдін Г., Зарка Ф., Рукер Х. О. Українська місія на Місяць: цілі та корисне навантаження. *Космічна наука і технологія*. 2018. Т. 24, № 1. С. 3–30. DOI: 0.15407/knit2018.01.003
50. Shkuratov Y. G., Konovalenko A. A., Zakharenko V. V., Stanislavsky A. A., Bannikova E. Y., Kaydash V. G., Stankevich D. G., Korokhin V. V., Vavriv D. M., Galushko V. G., Yerin S. N., Bubnov I. N., Tokarsky P. L., Ulyanov O. M., Stepkin S. V., Lytvynenko L. N., Yatskiv Y. S., Videen G., Zarka P., and Rucker H. O. A twofold mission to the moon: Objectives and payloads. *Acta Astronaut.* 2019. Vol. 154. P. 214–226. DOI: 10.1016/j.actaastro.2018.03.038
 51. Zakharenko V., Mylostna C., Konovalenko A., Zarka P., Fischer G., Griebmeier J.-M., Litvinenko G., Rucker H., Sidorchuk M., Ryabov B., Vavriv D., Ryabov V., Cecconi B., Coffre A., Denis L., Fabrice C., Pallier L., Schneider J., Kozhyn R., Vinogradov V., Mukha D., Weber R., Shevchenko V., and Nikolaenko V. Ground-based and spacecraft observations of lightning activity on Saturn. *Planet. Space Sci.* 2012. Vol. 61, Is. 1. P. 53–59. DOI: 10.1016/j.pss.2011.07.021
 52. Konovalenko A. A., Kalinichenko N. N., Rucker H. O., Lecacheux A., Fischer G., Zarka P., Zakharenko V. V., Mylostna K. Y., Griebmeier J.-M., Abranin E. P., Falkovich I. S., Sidorchuk K. M., Kurth W. S., Kaiser M. L., and Gurnett D. A. Earliest recorded ground-based decameter wavelength observations of Saturn's lightning during the giant E-storm detected by Cassini spacecraft in early 2006. *Icarus*. 2012. Vol. 224, Is. 1. P. 14–23. DOI: 10.1016/j.icarus.2012.07.024
 53. Kravtsov I. P., Zakharenko V. V., Vasylieva I. Y., Mykhailova S. S., Ulyanov O. M., Shevtsova A. I., Skoryk A. O., Zarka P., and Konovalenko O. O. Search for Transient Signals in the data of Decameter Survey of the Northern Sky. *Adv. Astron. Space Phys.* 2016. Vol. 6, Is. 2. P. 79–84. DOI: 10.17721/2227-148
 6. COMELLA, J. M., CRAFT, H. D., LOVELACE, R. V. E., SUTTON, J. M. and TYLER, G. L., 1969. Crab Nebula Pulsar NP0532. *Nature*. vol. 221, pp. 453–454. DOI: 10.1038/221453a0
 7. CODE, A. D., 1970. The Possible Effects of Scattering of Pulsar Radiation. *Astrophys. J.* vol. 159, pp. L29–L34.
 8. STAELIN, D. H. and SUTTON, J. M., 1970. Observed Shapes of Crab Nebula Radio Pulses. *Nature*. vol. 226, pp. 69–70. DOI: 10.1038/226069a0
 9. POPOV, M. V., KUZ'MIN, A. D., UL'YANOV, O. M., DESHPANDE, A. A., ERSHOV, A. A., ZAKHARENKO, V. V., KONDRAT'EV, V. I., KOSTYUK, S. V., LOSOVSKII, B. YA. and SOGLASNOV, V. A., 2006. Instantaneous Radio Spectra of Giant Pulses from the Crab Pulsar from Decimeter to Decameter Wavelengths *Astron. Rep.* vol. 50, is. 7, pp. 562–568. DOI: 10.1134/S1063772906070067
 10. ULYANOV, O. M., ZAKHARENKO, V. V., KONOVALENKO, O. O., LECACHEUX, A., ROSOLEN, C. and RUCKER, H. O., 2006. Detection of Individual Pulses from Pulsars B0809+74; B0834+06; B0943+10; B0950+08 and B1133+16 in the Decameter Wavelengths. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 11, no. 2, pp. 113–133. (in Russian).
 11. ULYANOV, O. M., DESHPANDE, A., ZAKHARENKO, V. V., ASGEKAR, A. and SHANKAR, U., 2007. Two-Frequency Observations of Six Pulsars Using UTR-2 and GEETEE Radio Telescopes. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 12, no. 1, pp. 5–20. (in Russian).
 12. UL'YANOV, O. M. and ZAKHARENKO, V. V., 2012. Energy of anomalously intense pulsar pulses at decameter wavelengths. *Astron. Rep.* vol. 56, is. 6. pp. 417–429. DOI: 10.1134/S1063772912060054
 13. ULYANOV, O. M., SKORYK, A. O., SHEVTSOVA, A. I., PLAKHOV, M. S. and ULYANOVA, O. O., 2016. Detection of the Fine Structure of the Pulsar J0953+0755 Radio Emission in the Decameter Wave Range. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* vol. 455, is. 1, pp. 150–157. DOI: 10.1093/mnras/stv2172
 14. SKORYK, A. O., ULYANOV, O. M., ZAKHARENKO, V. V., SHEVTSOVA, A. I., VASYLIEVA, I. Y., PLAKHOV, M. S. and KRAVTSOV, I. M., 2017. Fine Structure of Anomalously Intense Pulses of PSR J0814+7429 Radio Emission in the Decameter Range. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 22, no. 2, pp. 93–111. (in Russian). DOI: 10.15407/rpra22.02.093
 15. ULYANOV, O. M., SHEVTSOVA, A. I., ZAKHARENKO, V. V., SKORYK, A. O., VASYLIEVA, I. Y. and PLAKHOV, M. S., 2018. Time and Polarization Radiation Characteristics of PSR J0242+6256 at the Decameter Wavelength Range. *Kinemat. Phys. Celest. Bodies.* vol. 34, no. 4, pp. 174–183. DOI: 10.3103/S0884591318040062
 16. BRUCK, YU. M. and USTIMENKO, B. YU., 1973. Decametric Pulse Radioemission from PSR 0809, PSR 1133, and PSR 1919. *Nat. Phys. Sci.* vol. 242, is. 117, pp. 58–59. DOI: 10.1038/physci242058a0
 17. BRUK, YU. M. and USTIMENKO, B. YU., 1973. Methods and apparatus for observation of pulsars in the decameter wavelength range. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Radiofiz.* vol. 16, pp. 1867–1870. (in Russian).
 18. BRUK, YU. M. and USTIMENKO, B. YU., 1973. Procedure and Equipment for Observation of Pulsars in the Decameter Range of Wavelengths. *Radiophys. Quantum Electron.* vol. 16, is. 12, pp. 1450–1452. DOI: 10.1007/BF01037043

REFERENCES

19. BRUCK, YU. M. and USTIMENKO, B. YU., 1977. The Interpulse Radio Emission of the Pulsar PSR 191+21 at the Frequencies 16.7–38 MHz. *Astrophys. Space Sci.* vol. 51, pp. 225–227. DOI: 10.1007/BF00642474
20. BRUCK, YU. M. and USTIMENKO, B. YU., 1979. The Interpulse Emission Structure in Pulsars. *Astron. Astrophys.* vol. 80, pp. 170–173.
21. BRUK, YU. M., DAVIES, J. G., KUZ'MIN, A. D., LYNE, A. G., MALOFEEV, V. M., ROWSON, B., USTIMENKO, B. YU. and SHITOV, YU. P., 1978. Radio-emission spectra of five pulsars in the 17–1420 MHz range. *Sov. Astron.* vol. 22, pp. 588–593.
22. NOVIKOV, A. YU., POPOV, M. V., SOGLASNOV, V. A., BRUK, YU. M. and USTIMENKO, B. YU., 1984. Observations of pulsar PSR 0809+74 at a frequency of 25 MHz with a time resolution of 100 μ sec. *Sov. Astron.* vol. 28, is. 2, pp. 199–201.
23. UL'YANOV, O. M., ZAKHARENKO, V. V. and BRUK, YU. M., 2008. The parameters of pulsar subpulse emission at decimeter wavelengths. *Astron. Rep.* vol. 52, is. 11, pp. 917–924. DOI: 10.1134/S1063772908110061
24. SHITOV, YU. P., 1983. Period dependence of the spectrum and the phenomenon of twisting of the magnetic fields of pulsars. *Sov. Astron.* vol. 27, is. 3, pp. 314–321.
25. DAVIES, J. G., LYNE, A. G., SMITH, F. G., IZVEKOVA, V. A., KUZMIN, A. D. and SHITOV, YU. P., 1984. The magnetic field structure of PSR 0809+74. *Mon. Not. R. Astr. Soc.* vol. 211, is. 1, pp. 57–68. DOI: 10.1093/mnras/211.1.57
26. SHITOV, YU. P., 1985. Pulsar radio polarization and the magnetic-field twist effect. *Sov. Astron.* vol. 29, is. 1, pp. 33–39.
27. SHITOV, YU. P. and MALOFEEV, V. M., 1985. A superdispersion delay of the meter-wave pulses of PSR 0809+74. *Sov. Astron. Lett.* vol. 11, is. 1, pp. 39–42.
28. SHITOV, YU. P., MALOFEEV, V. M. and IZVEKOVA, V. A., 1988. Superdispersion delay of low-frequency pulsar pulses. *Sov. Astron. Lett.* vol. 14, is. 3, pp. 181–185.
29. ULYANOV, O. M., 1990. Aberration, retardation, and twist effects in pulsar radio emission observations. *Kinematika i fizika nebesnyh tel.* vol. 6, no. 4, pp. 63–67. (in Ukrainian).
30. KONDRATIEV, V., 2012. New results from LOFAR. In: J. VAN LEEUWEN, ed. *Neutron Stars and Pulsars: Challenges and Opportunities after 80 years. Proceedings IAU, Vol. 8, Symposium No. 291.* pp. 47–52. DOI: 10.1017/S1743921312023125
31. RYABOV, B. P. and GERASIMOVA, N. N., 1990. *Sporadic radio emission of Jupiter at decimeter wavelength.* Kiev, Ukraine: Naukova Dumka Publ. (in Russian).
32. BOEV, A. G. and LUK'IANOV, M. IU., 1989. On the theory of Cherenkov's radiation of plasma waves by the charge moving in the magnetoactive plasma. *Ukrainskii Fizicheskii Zhurnal.* vol. 34, is. 4, pp. 554–558. (in Russian).
33. BOEV, A. G. and LUK'IANOV, M. IU., 1990. Mechanism of the decametric S-emission of Jupiter. *Dopovidi Akademii Nauk Ukrain's'koi RSR. Ser. A.* pp. 52–55. (in Ukrainian).
34. BRAUDE, S. YA. and BRUK, YU. M., 1980. The analogy between the decameter radio emission of pulsars and that of Jupiter. *Sov. Astron. Lett.* vol. 6, is. 3, pp. 166–168.
35. BRUK, YU. M. and ZAKHARENKO, V. V., 1993. Broad-Band Compensation for Dynamic-Range Measurements by Intermodulation. *Instrum. Exp. Tech.* vol. 36, pp. 557–562.
36. ABRANIN, E. P., BRUK, YU. M. and ZAKHARENKO, V. V., 1997. Structure and Parameters of New System of Antenna Applification of Radio Telescope UTR-2. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 2, no. 1, pp. 95–102. (in Russian).
37. ABRANIN, E. P., BRUCK, YU. M., ZAKHARENKO, V. V. and KONOVALENKO, A. A., 2001. The New Preamplification System for the UTR-2 Radio Telescope. *Exp. Astron.* vol. 11, pp. 85–112. DOI: 10.1023/A:1011109128284
38. ULYANOV, O. M., SHEVTSOVA, A. I., MUKHA D. V. and SEREDKINA, A. A., 2013. Investigation of the Earth Ionosphere Using the Radio Emission of Pulsars. *Baltic Astron.* vol. 22, pp. 53–65.
39. ULYANOV, O. M., SHEVTSOVA, A. I. and SKORYK, A. O., 2013. Polarization Sounding of Pulsar Magnetosphere. *Bulletin of the Crimean Astrophysical Observatory.* vol. 109, no. 4, pp. 159–168. (in Russian).
40. ZAKHARENKO, V. V., VASYLIEVA, I. Y., KONOVALENKO, A. A., ULYANOV, O. M., SERYLAK, M., ZARKA, P., GRIEBMEIER, J.-M., COGNARD, I. and NIKOLAENKO, V. S., 2013. Detection of decametre-wavelength pulsed radio emission of 40 known pulsars. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* vol. 431, is. 4, pp. 3624–3641. DOI: 10.1093/mnras/stt470
41. VASYLIEVA, I. Y., ZAKHARENKO, V. V., KONOVALENKO, A. A., ZARKA, P., ULYANOV, O. M., SHEVTSOVA, A. I. and SKORYK, A. O., 2014. Decameter pulsar/transient survey of Northern sky. First results. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 19, no. 3, pp. 197–205. DOI: 10.15407/rpra19.03.197
42. ZAKHARENKO, V. V., KRAVTSOV, I. P., VASYLIEVA, I. Y., MYKHAILOVA, S. S., ULYANOV, O. M., SHEVTSOVA, A. I., SKORYK, A. O., ZARKA, P. and KONOVALENKO, O. O., 2015. Decameter Pulsars and Transients Survey of the Northern Sky. Status, First Results, Multiparametric Pipeline for Candidate Selection. *Odessa Astronomical Publications.* vol. 28, no. 2, pp. 252–255. DOI: 10.18524/1810-4215.2015.28.71047
43. KRAVTSOV, I. P., ZAKHARENKO, V. V., VASYLIEVA, I. Y., MYKHAILOVA, S. S., ULYANOV, O. M., SHEVTSOVA, A. I. and SKORYK, A. O., 2016. Parameters of the transient signals detected in the decameter survey of the Northern sky. *Odessa Astronomical Publications.* vol. 29, pp. 179–183. DOI: 10.18524/1810-4215.2016.29.85210
44. ZAKHARENKO, V. V., NIKOLAENKO, V. S., ULYANOV, O. M. and MOTIYENKO, R. A., 2007. A waveform receiver for continuous registration of fast processes in pulsar radio emission. In: *2007 International Kharkov Symposium Physics and Engrg. of Millimeter and Sub-Millimeter Waves (MSMW).* vol. 2, pp. 745–747. DOI: 10.1109/MSMW.2007.4294800
45. ZAKHARENKO, V. V., NIKOLAENKO, V. S., ULYANOV, O. M. and MOTIYENKO, R. A., 2007. A High Time Resolution Receiver for Radio Emission Investigation. *Radio Phys. Radio Astron.* 2007. vol. 12, no. 3, pp. 233–241. (in Russian).
46. ZAKHARENKO, V., KONOVALENKO, A., ZARKA, P., ULYANOV, O., SIDORCHUK, M., STEPKIN, S., KOLIADIN, V., KALINICHENKO, N., STANISLAVS-

- KY, 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., VASYLKIVSKYI, 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. and GRIEBMEIER, J.-M., 2016. Digital Receivers for Low-Frequency Radio Telescopes UTR-2, URAN, GURT. *J. Astron. Instrum.* vol. 5, no. 4, id. 1641010. DOI: 10.1142/S2251171716410105
47. KONOVALENKO, O. O., ZAKHARENKO, V. V., LYTVY-NENKO, L. M., ULYANOV, O. M., SIDORCHUK, M. A., STEPKIN, S. V., SHEPELEV, V. A., ZARKA, P., RUCKER, H. O., LECACHEUX, A., PANCHENKO, M., BRUCK, YU. M., TOKARSKY, P. L., BUBNOV, I. M., YERIN, S. M., KOLIADIN, V. L., MELNIK, V. M., KALINICHENKO, M. M., STANISLAVSKY, O. O., DOROVSKYY, V. V., KHRISTENKO, O. D., SHEVCHENKO, V. V., BELOV, O. S., GRIDIN, A. O., ANTONOV, O. V., BOVKUN, V. P., REZNICHENKO, O. M., BORTSOV, V. M., KVASOV, G. V., OSTAPCHENKO, L. M., SHEVCHUK, M. V., SHEVCHENKO, V. A., YATSKIV, YA. S., VAVILOVA, I. B., BRAUDE, I. S., SHKURATOV, Y. G., RYABOV, V. B., PIDGORNYY, G. I., TYMOSHEVSKY, A. G., LYTVYNNENKO, O. O., GALANIN, V. V., RYABOV, M. I., BRAZHENKO, A. I., VASHCHISHIN, R. V., FRANTSUZENKO, A. V., KOSHOVYY, V. V., IVANTYSHYN, O. L., LOZINSKY, A. B., KHARCHENKO, B. S., VASYLIEVA, I. Y., KRAVTSOV, I. P., VASYLKIVSKY, Y. V., LITVINENKO, G. V., MUKHA, D. V., VASYLENKO, N. V., SHEVTSOVA, A. I., MIROSHNICHENKO, A. P., KUHAJ, N. V., SOBOLEV, YA. M. and TSVYK, N. O., 2021. The Founder of the Decameter Radio Astronomy in Ukraine Academician of NAS of Ukraine Semen Yakovych Braude is 110 Years Old: History of Creation and Development of the National Experimental Base for the Last Half Century. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 26, no. 1, pp. 5–73. (in Ukrainian). DOI: 10.15407/rpra26.01.005
48. BRAZHENKO, A. I., BULATSEN, V. G., VASHCHISHIN, R. V., FRANTSUZENKO, A. V., KONOVALENKO, A. A., FALKOVICH, I. S., ABRANIN, E. P., ULYANOV, O. M., ZAKHARENKO, V. V., LECACHEUX, A. and RUCKER, H., 2005. New Decameter Radiopolarimeter URAN-2. *Kinematika i fizika nebesnyh tel.* vol. 21, no. 5 (suppl.), pp. 43–46.
49. SHKURATOV, Y. G., KONOVALENKO, A. A., ZAKHARENKO, V. V., STANISLAVSKY, A. A., BANNIKOVA, E. Y., KAYDASH, V. G., STANKEVICH, D. G., KOROKHIN, V. V., VAVRIV, D. M., GALUSHKO, V. G., YERIN, S. N., BUBNOV, I. N., TOKARSKY, P. L., ULYANOV, O. M., STEPKIN, S. V., LYTVYNNENKO, L. N., YATSKIV, Y. S., VIDEEN, G., ZARKA, P. and RUCKER, H. O., 2018. Ukrainian mission to the Moon: How to and with what. *Space Sci. Technol.* vol. 24, no. 1, pp. 3–30. (in Ukrainian). DOI: 0.15407/knit2018.01.003
50. SHKURATOV, Y. G., KONOVALENKO, A. A., ZAKHARENKO, V. V., STANISLAVSKY, A. A., BANNIKOVA, E. Y., KAYDASH, V. G., STANKEVICH, D. G., KOROKHIN, V. V., VAVRIV, D. M., GALUSHKO, V. G., YERIN, S. N., BUBNOV, I. N., TOKARSKY, P. L., ULYANOV, O. M., STEPKIN, S. V., LYTVYNNENKO, L. N., YATSKIV, Y. S., VIDEEN, G., ZARKA, P. and RUCKER, H. O., 2019. A twofold mission to the moon: Objectives and payloads. *Acta Astronaut.* vol. 154, pp. 214–226. DOI: 10.1016/j.actastro.2018.03.038
51. ZAKHARENKO, V., MYLOSTNA, C., KONOVALENKO, A., ZARKA, P., FISCHER, G., GRIEBMEIER, J.-M., LITVINENKO, G., RUCKER, H., SIDORCHUK, M., RYABOV, B., VAVRIV, D., RYABOV, V., CECCONI, B., COFFRE, A., DENIS, L., FABRICE, C., PALLIER, L., SCHNEIDER, J., KOZHYN, R., VINOGRADOV, V., MUKHA, D., WEBER, R., SHEVCHENKO, V. and NIKOLAENKO, V., 2012. Ground-based and spacecraft observations of lightning activity on Saturn. *Planet. Space Sci.* vol. 61, is. 1, pp. 53–59. DOI: 10.1016/j.pss.2011.07.021
52. KONOVALENKO, A. A., KALINICHENKO, N. N., RUCKER, H. O., LECACHEUX, A., FISCHER, G., ZARKA, P., ZAKHARENKO, V. V., MYLOSTNA, K. Y., GRIEBMEIER, J.-M., ABRANIN, E. P., FALKOVICH, I. S., SIDORCHUK, K. M., KURTH, W. S., KAISER, M. L. and GURNETT, D. A., 2012. Earliest recorded ground-based decameter wavelength observations of Saturn's lightning during the giant E-storm detected by Cassini spacecraft in early 2006. *Icarus.* vol. 224, is. 1, pp. 14–23. DOI: 10.1016/j.icarus.2012.07.024
53. KRAVTSOV, I. P., ZAKHARENKO, V. V., VASYLIEVA, I. Y., MYKHAILOVA, S. S., ULYANOV, O. M., SHEVTSOVA, A. I., SKORYK, A. O., ZARKA, P. and KONOVALENKO, O. O., 2016. Search for Transient Signals in the data of Decameter Survey of the Northern Sky. *Adv. Astron. Space Phys.* vol. 6, is. 2, pp. 79–84. DOI: 10.17721/2227-1481.6.79-84

O. M. Ulyanov

Institute of Radio Astronomy,
National Academy of Sciences of Ukraine,
4, Mystetstv St., Kharkiv, 61002, Ukraine

HISTORY OF LOW-FREQUENCY RESEARCH OF PULSARS

Purpose: The main most pronounced events, which occurred in the initial period of the pulsars' study at the decameter wavelength range, are presented. The example of the main scientific problems, which were formulated at the very beginning of pulsar research, shows how the emphasis and priorities of these studies have been changing over time, which tasks have finally been solved, and which are still waiting to be solved. It is shown how the ongoing modernization of the UTR-2 radio telescope have allowed to acquire new qualities in astrophysical research being made with this radio telescope and to identify new scientific directions. The exam-

ple of the cited references shows how the pulsar research efforts in Ukraine have been developed and how they were integrated into the world astrophysical research of these unique objects.

The purpose of this work is to show the relationship between the past and the present on the example of pulsars for longer than a semi-centennial period and to show how the scientific problems that were formulated in the past, and which could not be solved under the then-existing technical conditions, were solved by the subsequent generations of researchers.

Design/methodology/approach: The methods of comparison and historical parallels show how the low-frequency studies of pulsars have been developed and evolved almost from their discovery until now.

Findings: It is shown how quantitative transformations and technical development, as well as non-standard scientific ap-

proaches, unhackneyed thought and international cooperation allow to solve complex radio astronomical problems related to the low-frequency studies of pulsars.

Conclusions: The paper provides a historical overview of more than half a century-long radio astronomical studies of pulsars, having been and still being made at the decimeter band using the UTR-2 radio telescope. The “old” and current priorities in pulsar research are given, and it is shown how qualitatively the technical parameters of back end facility and computer performance have been changed in studying the coherent pulsar radio emission nature.

Key words: aberration, frequency band, pulse, interpulse, dispersion measure, rotation measure, plasma, pulsar, radio telescope

Стаття надійшла до редакції 17.05.2021