

Радіоастрономічний інститут
Національна академія наук України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах
рукопису

Кравцов Ігор Петрович

УДК 523.4-77

Дисертація
«ОГЛЯД ПІВНІЧНОГО НЕБА З МЕТОЮ ПОШУКУ ДЖЕРЕЛ
СПОРАДИЧНОГО РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ
ДЕКАМЕТРОВИХ ХВИЛЬ»

01.03.02 – астрофізика, радіоастрономія

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ І. П. Кравцов

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник:

Захаренко Вячеслав Володимирович

доктор фізико-математичних наук,

член-кореспондент НАН України

Харків – 2018

АНОТАЦІЯ

Кравцов І.П. Огляд Північного неба з метою пошуку джерел спорадичного радіовипромінювання декаметрових хвиль. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.03.02 «астрофізика, радіоастрономія». – Радіоастрономічний інститут Національної академії наук України; Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, Харків, 2018.

Спорадичне (транзієнтне) радіовипромінювання – це неперіодичні (неповторювані або повторювані на великих часових масштабах) сигнали, що породжуються різними космічними об'єктами та мають характерну тривалість сплесків від частин секунди до годин. Такий масштаб змінностей свідчить про наявність деяких швидкозмінних, вибухових процесів у невеликих областях простору. Тому для розуміння природи таких явищ, необхідно досліджувати транзієнтне випромінювання.

Дослідження джерел імпульсного космічного радіовипромінювання відбувається вже давно. Здебільшого, такі дослідження проводяться у високочастотній частині радіодіапазону. Всі відомі пульсари та радіотранзієнти, що обертаються (Rotating RAdio Transient, RRAT), були відкриті на частотах вище 30 МГц. Таким чином, виник суттєвий брак інформації про випромінювання, в першу чергу, різних типів нейтронних зір (НЗ) у найбільш низькочастотній частині електромагнітного спектру, що доступна для наземних спостережень – в декаметровому діапазоні. Те ж саме стосується й інших джерел спорадичного радіовипромінювання.

Спостереження в декаметровому діапазоні складні з кількох причин. Основними серед них є високий рівень галактичного шуму, значний вплив середовища поширення та потужні земні завади. Майже всі дослідження імпульсного випромінювання, що донедавна проводилися в декаметровому

діапазоні, стосувалися планет Сонячної системи, Сонця та невеликої кількості пульсарів. У випадку дослідження континуального випромінювання чи змінностей на хвилинних чи годинних часових масштабах, кількість досліджуваних об'єктів істотно зростає.

У першу чергу це зумовлено впливом розсіяння в міжзоряному середовищі, що зростає пропорційно ~ 4 степені частоти при її зниженні. Тому випромінювання далеких джерел інколи може помилково сприйматися як континуальне. Попри це, навіть у найближчих галактичних околицях Сонячної системи, дуже ймовірно, є багато об'єктів, що можуть породжувати спорадичне декаметрове випромінювання. Безсумнівно, до них можна віднести близькі пульсари, імпульси яких розширюються в напрямку низьких частот (аномально інтенсивні імпульси таких джерел, АП). Із цього витікає, що при випадковому розподілі пульсарів у просторі, видима їх кількість на низьких частотах має бути більшою, ніж на високих. До потенційно доступних для спостереження об'єктів необхідно включити також деякі інші НЗ. Не дуже давно були відкриті радіотранзієнти, що обертаються. Вони є нейтронними зорями, які випромінюють короткі та потужні імпульси приблизно раз на кілька сотень періодів. Крім того, сюди також можна віднести молоді одиночні НЗ (XDINS, X-Ray Dim Isolated Neutron Stars), які є видимими в рентгенівському діапазоні завдяки високій температурі поверхні (об'єкти молоді, $T \sim 10^6$ K).

Оцінки розмірів різних населень НЗ (пульсари, магнетари, RRAT, компактні центральні об'єкти в залишках наднових тощо) свідчать про досить велику їх кількість у Галактиці. Це створює проблему невідповідності кількості вибухів наднових кількості їх залишків. За оцінками, лише нейтронних зір існує набагато більше, ніж було вибухів наднових. Кількість останніх була визначена за допомогою γ -випромінювання радіоактивного алюмінію (^{26}Al), з одного боку, а загальна кількість НЗ – сумуванням усіх відомих їх типів – з іншого. Також не можна виключати існування інших типів еволюції наднових. Такі результати роблять актуальним і логічним

припущення про генетичний зв'язок між вищезгаданими об'єктами, тобто про перетворення одних на інші протягом всього часу життя. Тому для більш надійної статистики та для уточнення оцінок розмірів різних населень нейтронних зір, задача пошуку таких об'єктів є дуже актуальною.

Як відомо, пульсари були відкриті в результаті введення в дію радіотелескопа з великою ефективною площею та апаратури з часовою роздільною здатністю менше секунди, що була розроблена для дослідження мерехтіння радіовипромінювання квазарів. До цих експериментів застосовувалося тривале аналогове накопичення, яке підвищує чутливість, але придушує швидкі часові варіації. Це є прикладом того, як вдосконалення апаратури призвело до відкриття нового класу об'єктів, що у свою чергу дозволило досягти помітного прогресу в дослідженні фундаментальних властивостей матерії, будови об'єктів, що випромінюють, та дослідженні середовища поширення.

Найбільший у світі декаметровий радіотелескоп УТР-2, оснащений сучасною реєструючою апаратурою, дозволяє досліджувати імпульсне та спорадичне випромінювання широкого спектру галактичних і позагалактичних джерел. Його суттєвими перевагами є висока чутливість і широкосмуговість (до двох октав), що дозволяє досліджувати спектральні характеристики в декаметровому діапазоні. Аналіз характерних ознак радіовипромінювання відомих і очікуваних класів джерел (включно з різними типами зір, екзопланет, спорадичним випромінюванням об'єктів Сонячної системи) є необхідним у підготовці повного огляду Північного неба з метою пошуку транзієнтних джерел у декаметровому діапазоні.

Станом на 2010 рік було відомо про декаметрове радіовипромінювання приблизно 10 пульсарів, проте завдяки проведеній модернізації реєструючого обладнання радіотелескопу УТР-2, стало можливим здійснити перший декаметровий «перепис» пульсарів із мірами дисперсії (DM) менше 30 пк/см^3 та зареєструвати радіовипромінювання 40 із 74 таких джерел. Результати

цього «перепису» показали, що УТР-2 здатен детектувати випромінювання НЗ у низькочастотному діапазоні.

Повний огляд всього неба з метою пошуку джерел спорадичного радіовипромінювання ніколи не проводився. Через те, що НЗ концентруються близько до диску Галактики, майже всі їх пошукові огляди були зосереджені на дослідженні областей із низькими значеннями галактичної широти (b). Крім того, з тих же міркувань, час запису різних областей Галактики в оглядах буває різним: скажімо, 1 година – на низьких значеннях b , 20 хв – на середніх і 2 хв – на високих, біля полюсів. Тому проведення повного огляду неба з метою пошуку невідомих джерел спорадичного випромінювання є не лише дуже актуальною задачею, але й цілком реальною та досяжною як із точки зору наявності найбільшого у світі декаметрового радіотелескопу з сучасним реєструючим обладнанням, так і з точки зору наявності потрібних обчислювальних потужностей.

Таким чином, *дисертація присвячена* проведенню повного огляду Північного неба з метою пошуку невідомих джерел спорадичного радіовипромінювання (далі – Огляд) на найбільшому у світі радіотелескопі декаметрового діапазону – УТР-2.

В роботі зроблений детальний огляд відомих космічних джерел періодичного та спорадичного радіовипромінювання, проаналізована ймовірність їх випромінювання в низькочастотному діапазоні. Розглянуті пошукові огляди таких джерел, які проводилися на інших радіотелескопах і на більш високих частотах радіодіапазону. Також були розглянуті різні типи радіочастотних завад, які імітують сигнали космічної природи. Показано, що найкращим інструментом для проведення Огляду є найбільший у світі радіотелескоп даного діапазону – УТР-2. Також сформульовано концепцію, мету та задачі Огляду.

В його межах була проведена велика кількість спостережень на УТР-2 з метою завершення покриття всієї доступної частини небесної сфери.

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

Увесь масив даних був оброблений за допомогою комплексу спеціальних програм, що включає в себе очистку від завад, усунення впливу дисперсійної затримки та пошук інтенсивних сигналів.

В результаті цієї перевірки було відібрано приблизно 3300 сигналів, які далі аналізувалися більш детально. В результаті аналізу було відсіяно 2/3 сигналів і лишилося 980 «кандидатів», чиє випромінювання на динамічному спектрі виглядає як космічне.

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

Оскільки сигнали зі «зворотньою» DM мають явно завадову природу та їх ВІ 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 зі списку «кандидатів», був введений новий поріг: із їх переліку були видалені імпульси, що мають ВІ менше 8 СКВ. Сигналів, що перевищують такий рівень, виявилось 380.

Були побудовані розподіли різних параметрів даних імпульсів. Розподіл за часом появи показав, що сигнали розподілені рівномірно протягом часу спостережень. Розподіл ВІ сигналів із «прямою» мірою дисперсії дуже схожий на розподіл ймовірності появи АІ пульсарів залежно

від інтенсивності та кардинально відрізняється від аналогічного розподілу сигналів зі «зворотньою» DM. Розподіл DM сигналів, знайдених в Огляді, якісно схожий на модельний розподіл відомих пульсарів, які можна буде спостерігати на радіотелескопі SKA, той самий розподіл сигналів зі «зворотньою» DM теж виглядає зовсім інакше. Крім того, був побудований розподіл 380 імпульсів за галактичною широтою, порівняння його з аналогічним розподілом для 98 відомих близьких пульсарів (що мають $DM < 30 \text{ пк/см}^3$ та періоди більше 0.2 с) показало їх якісну подібність.

В дисертації отримані оригінальні результати, які розширюють частотний діапазон досліджень джерел спорадичного радіовипромінювання на декаметрові хвилі. Проведений повний огляд Північного неба, з однаковим часом спостережень усіх доступних областей Галактики.

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

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше в декаметровому діапазоні проведено повний огляд Північного неба з метою пошуку джерел транзієнтного випромінювання. Розроблені програми конвеєрної обробки даних спостережень, створено базу даних продетектованих сигналів. Знайдені сигнали мають відносну інтенсивність більше 8 СКВ 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 було доведено, що сигнали не можуть бути пояснені ефектом мерехтінь континуального випромінювання космічних джерел в іоносфері, а також належати до якогось типу штучних завад, які часто повторюються.

3. В результаті проведеного огляду в декаметровому діапазоні вперше виявлено 380 джерел транзйентного випромінювання. Їх розподіли по мірі дисперсії та галактичній широті вказують на те, що знайдені сигнали мають космічне походження.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що оскільки виявлені спорадичні сигнали, як припускається, пов'язані з нейтронними зорями, велика кількість знайдених імпульсів у декаметровому діапазоні підтверджує перспективність таких досліджень, що має посприяти створенню високочутливих інструментів. 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, радіотранзйєнти, що обертаються та ін.

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

ABSTRACT

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

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

Sporadic (transient) radio emission is a non-periodic pulses which are generated by various cosmic sources and have a characteristic duration from fractions of second up to an hours. Such a scale of variation suggests the presence of some fast-moving, explosive processes in a small region. Therefore, in order to understand the nature of such phenomena, it is necessary to investigate transient radiation.

The research of pulsed radio emission cosmic sources has been taking place for a long time. For the most part, such studies are carried out at the high radio frequencies. All known pulsars and rotating radio transients (RRATs) were discovered at frequencies above 30 MHz. Thus, there is a serious lack of information on radiation, first of all, of different types of neutron stars (NS) in the most low frequency part of the electromagnetic spectrum available for ground-based observations – in the decameter wave range. The same applies to other sources of sporadic radio emission.

Observations in the decameter wave range are complicated for several reasons. The main ones are the high level of galactic noise, the significant interstellar medium influence and powerful terrestrial radio frequency interference. Almost all pulsed radiation studies that were performed till the recent time in the decameter wave range were related to the planets of the Solar system, the Sun, and a small number of pulsars. In the case of studying of the continual radiation or

variations on minute or hourly scales, the number of investigated objects increases significantly.

First of all, this is due to the effect of scattering in the interstellar medium, which increases proportional to the fourth power of frequency when it decreases. Therefore, pulsed radiation from distant sources can sometimes be mistakenly interpreted as a continuum. Despite this, it is very likely that there are many objects that can generate sporadic decameter emission in the near Solar system galactic surroundings. Undoubtedly, close pulsars can be attributed to them, whose pulses expand at the low frequencies (anomalously intense pulses of such sources, AIP). It means that if pulsars are randomly distributed in space, their number which is available for low-frequency observations has to be greater than the number of them which are visible at higher frequencies. Some other types of NS must be included to the list of potentially available for observation objects. Not so long ago, rotating radio transients (RRATs) were discovered. RRATs are the neutron stars that emit short and powerful pulses about once every few hundred periods. In addition, X-Ray Dim Isolated Neutron Stars (XDINS) that are visible in the X-ray range due to high surface temperatures (young objects, $T \sim 10^6$ K) can also be included there.

Estimates of the different NS populations sizes (pulsars, magnetars, RRATs, compact central objects in the remnants of the supernovae, etc.) indicate a large enough their number in the Galaxy. This creates a problem of discrepancy between the number of supernova explosions and supernova remnants. According to the estimates, there are more NS in the Galaxy than there were the supernova explosions here. The number of supernova explosions was determined with the help of γ -radiation of radioactive aluminum (^{26}Al), on the one hand, and the total number of NSs – the summation of all their known types – on the other. Also, we can't exclude the existence of other types of supernova evolution. Such results make an actual and logical assumption about the genetic link between the above-mentioned objects, that is, the conversion of one to another throughout the lifetime. Therefore, for more reliable statistics and to refine estimates of the sizes of

different neutron stars populations, the task of searching for such objects is very important and relevant.

As you know, pulsars were discovered as a result of the introduction of the radio telescope with a large effective area and time-resolution equipment in fractions of second, which was developed to study the flickering of quasars' radio emission. These experiments used long-term analog accumulation, which increases the sensitivity, but suppresses fast time variations. This is an example of how the upgrading of the equipment led to the discovery of a new class of objects, which allowed us to achieve significant progress in the study of the fundamental properties of matter, the structure of the emitting objects, and the study of the propagation medium.

The world's largest decameter radio telescope, UTR-2, equipped with the modern recording equipment, allows to research pulsed and sporadic radiation of a wide range of galactic and extragalactic sources. Its significant advantages are high sensitivity and broadbandness (up to two octaves), which allows to investigate the spectral characteristics in the decameter wave range. The analysis of the characteristic features of known and expected radio emission sources (including various types of stars, exoplanets, sporadic radiation of the Solar system objects) is necessary for preparation of a complete survey of the Northern sky in order to find transient sources in the decameter wave range.

Up to 2010, approximately 10 pulsars were detected in the decametre wave range, but due to the upgrading of the recording equipment of the UTR-2 radio telescope, it became possible to carry out the world's first decameter pulsars "census" with dispersion measures less than 30 pc/cm^3 and radio emission of 40 out of 74 such sources was detected. The results of this "census" have shown that UTR-2 is able to detect the NS radiation in the low-frequency wave range.

A complete survey of the entire sky in order to find sources of sporadic radio emission has never been conducted. Due to the fact that the NS are concentrated near the disk of the Galaxy, almost all of their searches were focused on the study of regions with low galactic latitudes (b). In addition, for the same reasons, the

time of recording the different regions of the Galaxy in surveys is different: for example, 1 hour – at low b , 20 minutes – at mid-latitudes and 2 minutes – at high b , near the poles. Therefore, conducting a complete survey of the sky due to find unknown sources of sporadic radiation is not only a very important task, but also quite real and achievable in terms of the availability of the world's largest decameter radio telescope with modern recording equipment and in terms of the availability of the necessary computing power.

Thus, *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) at the world's largest decameter wave range radio telescope – UTR-2.

In present work a detailed review of known cosmic sources of periodic and sporadic radio emission is made, and the probability of their radiation presence in the low-frequency wave range is 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. Also 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 wave range – UTR-2. It also formulates the concept, purpose and objectives of the Survey.

There was carried out a large number of UTR-2 observations due to fully cover the available part of celestial sphere. The total duration of the observations recorded in the Survey is about 5000 hours, and the size of observational data is about 100 TB.

The whole data was processed using the special automated routines, which include RFI mitigation, the dispersion delay compensation and the search for intensive individual pulses.

As a result of this check, approximately 3300 signals were selected, which then had to be analyzed more detailed. Because of the analysis, 2/3 of the signals were sent out and about 1000 “candidates” left, whose radiation looked like a cosmic on the dynamic spectrum.

It was suggested that there could be a certain amount of interference generated by the flickering of continuum radio emission sources on the inhomogeneities of the ionosphere among the candidates. To verify this hypothesis, the observational data were inverted in time and processed as usual (i. e., the search for probable signals with a “reverse” dispersion measure, whose time delay was not proportional to f^{-2} , but $-f^{-2}$ was performed). Processing 10% of the inversed data allowed to detect 100 signals, but the relative intensity (RI) of none of them exceeded the value of 7.2 RMS (root mean square). In addition, their comparison with the “candidate” signals showed the fundamental difference between them and completely different origin.

Since the signals with “reverse” DM have obviously interference nature and their RI does not exceed 7.2 RMS, one can conclude that random emission (regardless of the sign of the frequency-time dependence law) can’t give RI more than 8 RMS. Therefore, in order to eliminate the probable low-intensity RFI from the list of «candidates», a new threshold was introduced: pulses with $RI < 8$ RMS were removed from the aforementioned list. The number of signals that exceed this threshold is 380.

After that, distributions of different parameters 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’ RIs distribution with a «direct» dispersion measure is very similar to the distribution of the probability of occurrence of anomalously intense pulsar’s pulses depending on the intensity and is fundamentally different from the analogous distribution for signals with the «reverse» DM. The DMs distribution of signals found in the Survey, which is quite similar to the simulated DMs distribution of known pulsars, which will be available for observing at the SKA radio telescope, the same distribution of signals with "reverse" DM also looks quite different. 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 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, with the same time observing of all available regions of the Galaxy.

Such surveys should be carried out in the future repeatedly. The developed set of routines, algorithms, methods of observation and data processing make these studies effective and informative, and since it is about the closest stellar surroundings, it is also undoubtedly very valuable for astronomy.

Scientific novelty of the thesis results is the following:

1. For the first time, a complete survey of the Northern Sky in order to find the sources of transient radiation in the decameter wave range was conducted. Routines for pipeline processing of observational data were developed, database of detected signals was created. 380 signals with relative intensity more than 8 RMS and which meet the cosmic origin criteria were found. Because of high precision of dispersion measure measurement at UTR-2 it is possible to exclude the signals of known pulsars from the database.

2. Using the developed time data inversion routine, it was proved that these signals can't be explained by the ionosphere scintillation of cosmic sources' continuous radiation effect and also can not belong to some type of artificial interference, which are often repeated.

3. As a result of the Survey, for the first time 380 transient emission sources were discovered in the decameter wave range. Their parameters' distributions (of DMs and galactic latitudes) indicate a cosmic origin of these signals.

The practical significance of the work is the following. Since the detected sporadic signals are believed to be related to neutron stars, then the large number of pulses found in the decameter range confirms the prospect of such research and should further focus researchers on the creation of high-sensitivity instruments. A new data which include signals parameters distributions can be used for population synthesis theory creating and for investigation of possible evolutionary connection

between the different neutron stars populations, such as various types of the pulsars, rotating radio transients etc.

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

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА 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. Miroshnichenko, 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. Vasylyivskyi, 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).*

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ, ЯКІ ЗАСВІДЧУЮТЬ АПРОБАЦІЮ МАТЕРІАЛІВ ДИСЕРТАЦІЇ (ТЕЗИ ДОПОВІДЕЙ НА НАУКОВИХ КОНФЕРЕНЦІЯХ)

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. Vasylieva, **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. Vasylieva, 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**, I. Y. Vasylieva. 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. Vasylieva, 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).*

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	24
ВСТУП	25
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯДИ ПУЛЬСАРІВ І ДЖЕРЕЛ СПОРАДИЧНОГО РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ (ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ).....	31
1.1. Транзйентне випромінювання. Типи джерел транзйентного радіовипромінювання	35
1.2. Спостереження пульсарів і транзйентних джерел на високих частотах радіодіапазону	48
1.3. Значущість дослідження транзйентів у найнижчій частині радіодіапазону	49
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1	57
РОЗДІЛ 2. ПАРАМЕТРИ ОГЛЯДУ. МЕТОДИ ТА ІНСТРУМЕНТИ СПОСТЕРЕЖЕНЬ, ОБРОБКА ДАНИХ	59
2.1. Інструменти та параметри огляду Північного неба	59
2.1.1. Визначення цілей і задач огляду Північного неба	61
2.1.2. Концепція та параметри огляду Північного неба на УТР-2	63
2.1.3. УТР-2.....	72
2.1.4. Приймачі	74
2.2. Обробка спостережних даних.....	77

2.2.1. Характеристики земного випромінювання, яке імітує космічні сигнали (земні радіочастотні завади).....	79
2.2.2. Усунення радіочастотних завад	83
2.2.3. Усунення дисперсійної затримки.....	91
2.2.4. Пошук індивідуальних імпульсів.....	96
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2	109
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ. ВИЯВЛЕННЯ ІНДИВІДУАЛЬНИХ ІМПУЛЬСІВ КОСМІЧНИХ РАДІОДЖЕРЕЛ	110
3.1. Пошук індивідуальних космічних імпульсів	111
3.2. Розподіл сигналів за часом появи. Тест із від'ємною DM.....	138
3.3. Розподіли сигналів за мірою дисперсії.....	151
3.4. Розподіли за галактичною широтою (b)	154
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3	159
ВИСНОВКИ.....	161
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	163
ДОДАТКИ.....	176

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

НЗ	Нейтронна зоря
С/Ш	Співвідношення «Сигнал/Шум»
АП	Аномально інтенсивні імпульси
ГІ	Гігантські імпульси
МЗС	Міжзоряне середовище
МД	Міра дисперсії
DM	Dispersion measure
СКВ	Середньоквадратичне відхилення
DSP-Z	Digital Signal Processing
ГХ	Гравітаційні хвилі
PMPS	Parkes Multibeam Pulsar Survey
FRB	Fast Radio Burst
МСП	Мілісекундні пульсари
RRAT	Rotating Radio Transients
XDIN	X-Ray Dim Isolated Neutron Star

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Дослідження швидких, вибухових процесів перетворення матерії й енергії, коротких – а отже, таких, що відбуваються у компактних областях простору із 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, радіотранзіїєнти, що обертаються, та деяких інших.

Саме тому пошук одиночних імпульсів різних типів нейтронних зір, а також транзїєнтних сигналів іншої природи є актуальним напрямом астрономїчних 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° 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 розсієння ($\sim f^{-4}$) 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, в якого незадовго до того була модернізована прийомна апаратура, було виявлене випромінювання 40 відомих пульсарів із 74, що мають міру дисперсії $DM < 30$ пк/см³. В даний час ці 40 пульсарів є найбільш повним

набором таких об'єктів, у яких було продетектоване 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, і чутливість) дають можливість провести перший у світі огляд всього Північного неба з метою пошуку спорадичних сигналів різноманітної природи.

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

- провести заключні спостереження на УТР-2 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 радіовипромінювання 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 одержаних результатів.

1. Вперше в декаметровому діапазоні проведено повний огляд Північного неба з метою пошуку джерел транзієнтного випромінювання (далі – Огляд). Були створені програми як автоматичної, так і напівавтоматичної (на різних етапах) обробки спостережних даних, а також пошуку й аналізу сигналів. Створено базу даних, що містить параметри виявлених імпульсів. Вперше в декаметровому діапазоні було виявлено 380 сигналів, що мають відносну інтенсивність більше 8 СКВ (середньоквадратичних відхилень) і відповідають критеріям космічного походження. Оскільки при широкосмугових спостереженнях у декаметровому діапазоні точність визначення значення міри дисперсії є великою, то зі знайдених сигналів ще на ранніх етапах обробки були виключені імпульси відомих пульсарів.

2. Для перевірки можливого іоносферного походження сигналів був розроблений метод інвертування даних у часі. За його допомогою було показано, що вищезгадані сигнали не могли бути породжені мерехтінням континуального випромінювання космічних радіоджерел в іоносфері, а також належати до певних повторюваних штучних завад.

3. Вперше в декаметровому діапазоні було виявлено 380 джерел спорадичного радіовипромінювання. Були побудовані розподіли параметрів сигналів цих джерел, таких як міра дисперсії, галактична широта, відносна інтенсивність. Аналіз і порівняння їх із аналогічними розподілами параметрів пульсарів, радіотранзієнтів, що обертаються та аномально інтенсивних і

гігантських імпульсів пульсарів чітко підтверджує космічну природу знайдених сигналів.

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 у розробці програм обробки й аналізу даних, в обробці значної частини даних цих спостережень (заключні етапи обробки проводив автор особисто – майже повністю) та аналізі отриманих результатів, а також у підготовці публікацій за темою досліджень, підготовці доповідей та представлення результатів роботи на конференціях і семінарах.

Апробація матеріалів дисертації. Результати дисертаційної роботи були представлені у 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 Odesa International Astronomical Gamow Conference-School: “Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology, Cosmomicrophysics, Astroparticle Physics, Radioastronomy and Astrobiology” (Odesa, Ukraine, August 16–23, 2015);
- International Young Scientists Forum on Applied Physics (Dnipro, Ukraine, September 29 – October 2, 2015) – 3 доповіді;
- 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 Odesa International Astronomical Gamow Conference-School: «Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology, Cosmomicrophysics, Astroparticle Physics, Radioastronomy and Astrobiology» (Odesa, Ukraine, August 14-20, 2016);

- II International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (Kharkiv, Ukraine, October 10 – 14, 2016) – 3 доповіді;
- 17th Odesa 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).

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.

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

- «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» (№ держреєстрації 0117U002394);
- «Надчутливі і надширокосмугові дослідження окремих об'єктів Всесвіту у низькочастотному діапазоні» (№ держ. реєстрації 0118U003073);

Практичне значення отриманих результатів. Припускається, що виявлені спорадичні сигнали породжені, здебільшого, різними типами

нейтронних зір. Тому велика кількість таких імпульсів, які продетектовані на декаметрових хвилях вперше, яскраво ілюструє малодослідженість низькочастотного діапазону. Це означає, що проведення подібних досліджень (в першу чергу – оглядів) є актуальним, а головне – перспективним напрямком астрофізики. Перспективність дослідження саме низькочастотного діапазону повинна викликати все більший інтерес, що має призвести до створення нових високочутливих радіотелескопів, які працюватимуть у найнижчій частині доступного для наземних спостережень радіодіапазону. Отримані в роботі нові розподіли параметрів знайдених сигналів у майбутньому цілком можуть бути використані при дослідженні еволюції нейтронних зір, створенні теорії популяційного синтезу та для перевірки гіпотези про ймовірний еволюційний зв'язок різних типів нейтронних зір (пульсарів, RRAT і т. д.).

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯДИ ПУЛЬСАРІВ І ДЖЕРЕЛ СПОРАДИЧНОГО РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ (ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ)

Транз'єнтне радіовипромінювання (неперіодичне, одиночні імпульси) генерується космічними об'єктами та має характерну тривалість сплесків від частин секунди до годин. Це, в свою чергу, свідчить про вибухові, динамічні процеси, що відбуваються в досить малих областях простору. Дослідження такого випромінювання може допомогти зрозуміти механізми явищ, що мають місце в джерелах транз'єнтного випромінювання.

У випадку найбільш низькочастотного випромінювання, яке доступне для наземних спостережень, задача його дослідження значно ускладнена високим рівнем галактичного шуму, земних завад та істотним впливом середовища поширення. Практично всі спостереження, які проводяться на найбільших декаметрових радіотелескопах і пов'язані з дослідженням імпульсного випромінювання на часових масштабах від частинок секунд до секунд, стосуються Сонця, планет Сонячної системи та невеликої кількості пульсарів. Якщо ж мова йде про континуальне випромінювання або ж змінності тривалістю хвилини чи години, то кількість таких джерел (а отже – й об'єктів дослідження) значно більша.

У першу чергу це зумовлено впливом міжзоряного середовища (МЗС) (точніше, розсіяння в МЗС), яке зростає пропорційно ~ 4 степені частоти при її зниженні. Саме через це випромінювання далеких джерел сприймається як континуальне. Тим не менше, навіть у найближчому галактичному оточенні, дуже ймовірно, є досить велика кількість об'єктів, які можуть бути джерелами транз'єнтного декаметрового випромінювання. Звичайно, ці джерела є дуже цікавими об'єктами для досліджень. До них можна віднести близькі пульсари, імпульси яких розширюються ($\propto f^{-0.25}$) [1] у напрямку низьких частот. Це означає, що при випадковому розподілі пульсарів у

просторі, кількість видимих на низьких частотах має бути більшою, ніж на високих. Крім того, відкриття значної кількості пульсарів дозволить зробити статистично обґрунтоване заключення про властивості випромінювання в низькочастотній частині спектру та, як наслідок, уточнити наявну модель випромінювання. До потенційно доступних для спостереження джерел слід також включити й інші типи нейтронних зір (НЗ). Відносно нещодавно були відкриті радіотранзіїєнти, що обертаються (Rotating Radio Transients, RRAT) [2]. Це нейтронні зорі, що випромінюють короткі та досить потужні імпульси приблизно раз на декілька сотень періодів. Крім того, до таких джерел можуть відноситися й молоді одиночні НЗ (XDINS, X-Ray Dim Isolated Neutron Stars) [3], які видно в рентгенівському діапазоні завдяки високій температурі поверхні (об'єкти молоді та не встигли охолонути, $T \sim 10^6$ K).

Оцінки розмірів різних популяцій НЗ (пульсари, магнетари, RRAT, компактні центральні об'єкти в залишках наднових і т. д.) свідчать про досить велику їх кількість у Галактиці. А це, в свою чергу, створює проблему невідповідності кількості вибухів наднових кількості їх залишків. Самих лише нейтронних зір, за оцінками, існує значно більше, ніж було вибухів наднових. Кількість останніх була визначена за допомогою γ -випромінювання радіоактивного алюмінію (^{26}Al) [4] – з одного боку, а загальна кількість НЗ – сумуванням усіх їх відомих типів – із іншого. Також не виключено існування інших типів еволюції наднових. Такі результати роблять актуальним і логічним припущення про генетичний зв'язок між вищезгаданими об'єктами, тобто про перетворення одних на інші протягом всього часу життя.

У роботі [5] представлений детальний і критичний огляд поточного стану розрахунків народжуваності різних типів НЗ. Виходячи з цього огляду, припускається, що поточна частота вибухів гравітаційно колапсуючих наднових (core collapse supernova, CCSN) не може пояснити народжуваність різних населень НЗ (рис. 1.1).

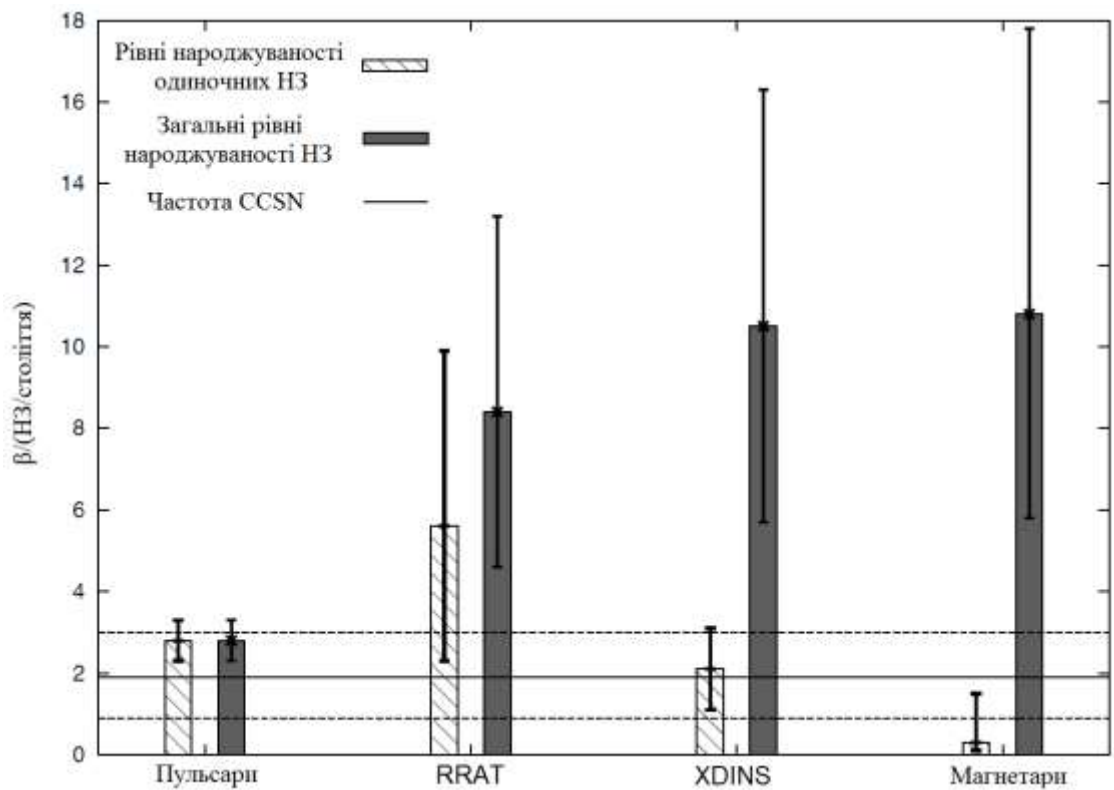


Рис. 1.1. Оціночні рівні народжуваності різних населень НЗ і їх сумарного населення. Частота CCSN показана суцільною горизонтальною лінією, а похибки її визначення – штриховими лініями [5].

Якщо не з'являться нові оцінки народжуваності (робота опублікована у 2014 році), які значно відрізнятимуться від наведених тут, то виникне проблема народжуваності. Якщо це так, то автори віддають перевагу еволюційній теорії, в якій радіопульсари, RRAT та XDINS (і, можливо, магнетари) є різними етапами еволюційного розвитку того самого об'єкту. Іншим можливим, але більш екзотичним рішенням, є припущення про існування інакшого, поки що невідомого механізму формування НЗ. Незважаючи на те, що народжуваності XDINS, RRAT і магнетарів поки що точно не визначені, автори стверджують, що загальноприйняті неточності в оцінках цих народжуваностей (якщо вони справді вірні) недостатньо великі для того, щоб переконливо усунути описану проблему. Тому важливо знайти істотно більшу кількість цих джерел для надійнішого статистичного аналізу. Через це огляди з метою пошуку пульсарів, RRAT і транзієнтів не втрачають

своїї актуальності. Існують перспективи відкриття XDINS та магнетарів майбутніми обсерваторіями високих енергій. Радіоогляди включають огляд P-ALPHA на Arecibo [6], спостереження пульсарів і транзієнтів за допомогою LOFAR (LOw Frequency ARray) [7] та нових багатопроменевих оглядів всього неба на Парксі й Еффельсберзі [8]. Зрештою, Галактичний перепис пульсарів за допомогою SKA (Square Kilometre Array) [9] повинен феноменально розширити знання про нейтронні зорі в Галактиці за допомогою очікуваного детектування приблизно ~ 20000 нових пульсарів. Разом SKA та LOFAR будуть, по суті, постійно спостерігати за Північною та Південною півкулями. Навіть якщо спектр радіотранзієнтів, а отже – й потенціал для відкриття на низьких частотах все ще має бути оцінений, обидва телескопи повинні дозволити потенційно спостерігати найбільше RRAT у Галактиці, які направлені на Землю. Іншими словами, спостереження на SKA, напевно, встановлять відносні розміри популяцій RRAT і пульсарів, підтверджуючи чи спростовуючи результати даної роботи. Дуже важлива інформація має бути отримана і значно раніше, за допомогою LOFAR. Також значний внесок у дослідження цих об'єктів може зробити найбільший у світі радіотелескоп декаметрового діапазону довжин хвиль – УТР-2 (Український Т-подібний Радіотелескоп другої модифікації) завдяки своїй широкосмуговості та високій чутливості [10]. Крім того, в даний час будується радіотелескоп ГУРТ (Гігантський Український Радіотелескоп), що працює не лише в декаметровому, але й у нижній частині метрового радіодіапазону, котрий теж, безсумнівно, зробить значний внесок у дослідження різних популяцій НЗ у Галактиці [10].

Крім названих об'єктів можна також згадати ще деякі: білі карлики (БК), які обертаються, тісні подвійні системи (ТПС), об'єкти типу системи пульсара B1257+12 із трьома екзопланетами, які завдяки наявності сильних магнітних полів і обертання також можуть бути джерелами транзієнтного випромінювання.

Дослідження космічного радіовипромінювання джерел на коротких часових масштабах є одним із найважливіших напрямів сучасної астрономії. Дослідники на всіх довжинах хвиль прагнуть досягти максимально можливої в даному діапазоні довжин хвиль часової роздільної здатності. Причиною цього є те, що транзієнтне та спорадичне радіовипромінювання породжується в компактних областях і пов'язане з надзвичайно цікавими та важливими вибуховими або динамічними подіями, що забезпечують унікальні можливості для дослідження фундаментальних аспектів астрофізики. Крім того, радіоджерела з короткою тривалістю перехідних процесів є потужним інструментом для дослідження міжзоряного середовища завдяки ефектам дисперсії та розсіювання, а також магнітних полів завдяки ефектові Фарадея. Дослідження транзієнтних, короткоперіодичних подій, ймовірно, зробить помітний вклад у розвиток теорії сильного гравітаційного поля, ядерної фізики, астрофізики, космології, зореутворення і т.п.

1.1. Транзієнтне випромінювання. Типи джерел транзієнтного радіовипромінювання

Як вже було зазначено, транзієнтне радіовипромінювання дозволяє дослідити внутрішню структуру та природу різних об'єктів, включаючи фундаментальні астрофізичні аспекти, а ефекти розсіювання та фарадеївського обертання площини поляризації – властивості середовища, в якому це радіовипромінювання поширюється. Найбільший у світі декаметровий радіотелескоп УТР-2, оснащений сучасною приймальною та реєструючою апаратурою, дозволяє досліджувати імпульсне та спорадичне випромінювання широкого спектру галактичних і позагалактичних джерел. Суттєвими перевагами УТР-2 є висока чутливість і широкосмуговість (до двох октав), що дозволяє досліджувати спектральні характеристики в декаметровому діапазоні. Аналіз характерних ознак радіовипромінювання відомих і очікуваних класів джерел (включно з різними типами зір, екзопланет, спорадичного випромінювання об'єктів Сонячної системи тощо)

є необхідним у підготовці повного огляду Північного неба з метою пошуку джерел спорадичного випромінювання в декаметровому діапазоні (далі – Огляд).

Пошуки радіотранзіїв мають довгу історію. Відомо багато їх видів, починаючи від найближчих (широкосмугові сплески, породжені космічними променями ультрависоких енергій, що зіштовхуються з земною атмосферою та генерують зливи вторинних частинок) до тих, які знаходяться на космологічних відстанях (гамма-спалахи).

Як відомо, пульсари були відкриті в результаті введення в дію радіотелескопа з великою ефективною площею та апаратури з часовою роздільною здатністю в частки секунди, яка була розроблена для дослідження мерехтіння радіовипромінювання квазарів [11]. До цих експериментів застосовувалося тривале аналогове накопичення (за рахунок радіометричного виграшу, який пропорційний кореню квадратному з добутку значення смуги частот і часової сталої низькочастотного фільтру), яке підвищує чутливість, але придушує швидкі часові варіації. Цей випадок є прикладом того, як вдосконалення апаратури призвело до відкриття нових класів об'єктів, яке, у свою чергу, дозволило істотно просунутися в дослідженні фундаментальних властивостей матерії, будови об'єктів, що випромінюють, і дослідженні властивостей середовища поширення.

У даній частині розділу проводиться огляд широкого спектру відомих і таких, чиє існування припускається, транзійтних радіоджерел, які можуть бути виявлені та досліджені новим поколінням радіотелескопів [12]. Подібні огляди [13] проводяться при проектуванні та постановці наукових задач для таких масштабних проектів, як SKA і LOFAR. Нижче наведено перелік існуючих джерел імпульсного, спорадичного і транзійтного випромінювання.

Нестационарне випромінювання об'єктів Сонячної системи

Радіовипромінювання об'єктів Сонячної системи в декаметровому та метровому діапазонах, завдяки їх близькості до Землі та характерним особливостям спектрів нетеплового випромінювання (особливо, самого Сонця та Юпітера з супутником Іо), є найбільш інтенсивним і детально дослідженим.

Сонце. Виділені на початкових етапах дослідження Сонця типи спалахів (I-V типи, дрейфуючі пари, лямбда-сплески, страї і т. д.) при збільшенні чутливості, широкосмуговості, часової та частотної роздільної здатності доповнюються все новими різновидами [14].

Юпітер, система Юпітер-Іо. Власне радіовипромінювання Юпітера та спорадичне Іо-контрольоване випромінювання з характерними часовими масштабами від секунд до мікросекунд становлять самостійний інтерес. Крім того, Юпітер і система Юпітер-Іо є прикладом можливих планетних систем в інших зір, які можуть бути джерелами радіовипромінювання за аналогією з планетами Сонячної системи [15-17].

Гроза активність планет. Відкриття космічними апаратами (КА) «Вояджер» імпульсного широкосмугового радіовипромінювання в діапазоні від 1 до 40 МГц, що породжується грозовими розрядами на Сатурні (Saturn Electrostatic Discharges – SED) і Урані (Uranus Electrostatic Discharges – UED), отримало подальший розвиток в дослідженнях КА «Кассіні» і за допомогою наземних спостережень, таких, як на УТР-2 [18]. Це не лише демонструє потенціал наземної радіоастрономії, але і створює істотні передумови для можливого виявлення подібних явищ на Юпітері та Венері. Виявлення такого радіовипромінювання дасть ключ для дослідження іоносфери, атмосфери та дослідження характеристик планет.

Екзопланети. Радіовипромінювання планет із магнітним полем

Всі планети з сильним магнітним полем (Земля, Юпітер, Сатурн, Уран і Нептун) випромінюють у радіодіапазоні. Прикладом може служити радіовипромінювання Юпітера або кілометрове радіовипромінювання Сатурна. Схоже, що деякі з відомих екзопланет також мають сильне магнітне поле [19] і можуть породжувати транзйентне радіовипромінювання. Слід зазначити, що перші екзопланети були виявлені під час проведення досліджень, які пов'язані з таймінгом пульсара PSRB1257+12. Припускається, що за аналогією з планетами Сонячної системи, відомі екзопланети будуть випромінювати в діапазоні 1-1000 МГц зі щільністю потоку 10-100 мкЯн [13]. Детектування радіовипромінювання буде безпосереднім виявленням, на відміну від непрямого відкриття більшості відомих на сьогоднішній день екзопланет за спостереженнями зміщення зорі, яка обертається з даною планетою довкола спільного центру мас, затемнень або гравітаційного лінзування.

Зорі

В даний час проводиться інтенсивний пошук та дослідження спалахової активності різних типів зір, таких як червоні, коричневі та білі карлики. На низьких частотах очікуються потоки до кількох десятків янських. В ролі джерела енергії спалахів розглядається магнітна активність зір. Спалахи радіовипромінювання від різних активних спалахуючих зір і зоряних систем спостерігаються в широкому діапазоні частот [20-22]. Ці спалахи пояснюються прискоренням частинок під дією магнітного поля.

Нейтронні зорі

Після відкриття пульсарів і виявлення великої їх кількості, деякий час вважалося, що еволюція нейтронних зір проходить за досить схожим сценарієм. Пульсар у Крабовидній туманності служив еталоном, а інші типи пульсарів були ілюстрацією перебування НЗ на різних етапах розвитку.

Однак відкриття магнетарів [23], радіотранзієнтів, що обертаються [2], рентгенівських радіотихих одиночних НЗ (X-ray Dim Isolated Neutron Stars – XDINS) [24], пульсарів «на півставки» (так звані «інтермітентні» пульсари, які інколи просто перестають випромінювати на якийсь час) [25], аномальних рентгенівських пульсарів, гамма-сплесків і зв'язку радіопульсарів із рентгенівськими [26] виявили широкий спектр можливих шляхів еволюції НЗ і, відповідно, їх спостережних проявів.

Гігантські імпульси (ГІ) пульсарів. Хоча для всіх пульсарів характерні варіації інтенсивності від імпульсу до імпульсу [27], у деяких пульсарів були виявлені так звані «гігантські» імпульси – імпульси з інтенсивностями, які в 100, 1000 та більше разів перевищують середню інтенсивність. Пульсар у Крабовидній туманності (PSR B0531+21) був першим пульсаром, у якого виявили такі імпульси. Останнім часом у пульсара в Крабі були зареєстровані імпульси зі щільністю потоку $> 10^6$ Ян і тривалістю всього 0.4 нс на частотах 6-10 ГГц [28, 29]. Ці «нано-гігантські» імпульси відповідають еквівалентній яскравісній температурі 10^{41} К і на даний час є найбільш потужними серед спалахів відомих астрономічних об'єктів. Протягом багатьох років це явище вважалося унікальною характеристикою Краба. Однак з тих пір гігантські імпульси були виявлені в більш, ніж десяти пульсарів Галактики та крабоподібних пульсарів у Великій Магеллановій Хмарі [30]. Приклад розподілу енергій гігантських імпульсів наведений на рис. 1.2. Цей та інші набори даних показують степеневий характер залежності ймовірності детектування від енергії імпульсу.

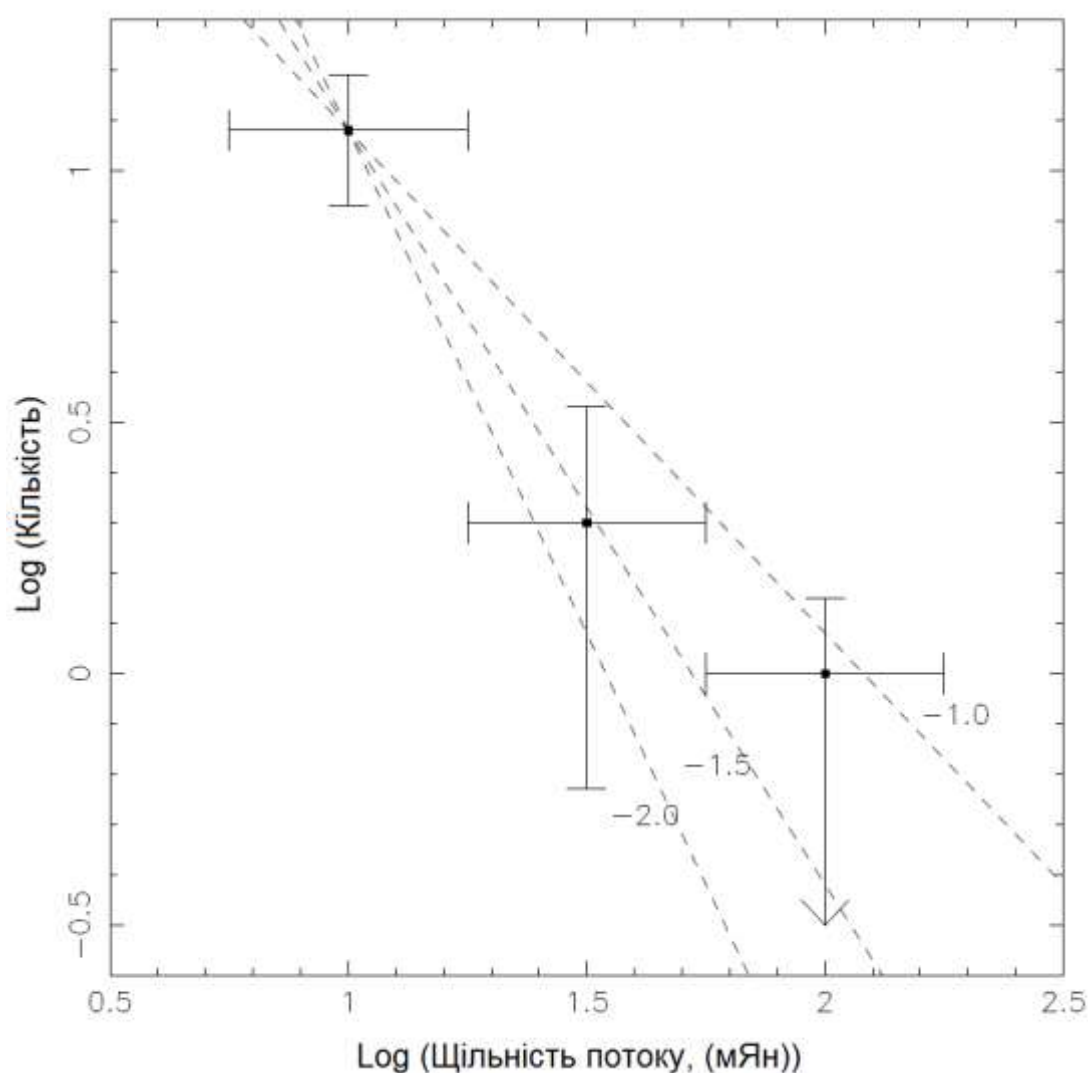


Рис. 1.2. Розподіл 15 гігантських імпульсів пульсара за інтенсивностями (в логарифмічних координатах) [29].

Аномально інтенсивні імпульси (АІ) пульсарів. Це явище, що було відкрите в декаметровому діапазоні [31], має багато спільного з ГІ: інтенсивність АІ перевищує інтенсивність «звичайних» імпульсів в десятки та сотні разів, залежність енергії АІ від ймовірності їх появи має степеневий характер. Але існують і деякі характерні риси, які не дозволяють переплутати їх із ГІ. Наприклад, енергія, що виділяється в ГІ, складає частинки відсотків від енергії, яка випромінюється у «звичайних» імпульсах, а АІ можуть містити близько половини повної енергії, що випромінюється пульсаром у

декаметровому діапазоні. Розподіл АІ пульсара за інтенсивністю показаний на рис. 1.3. Горизонтальною лінією позначена ймовірність 50%.

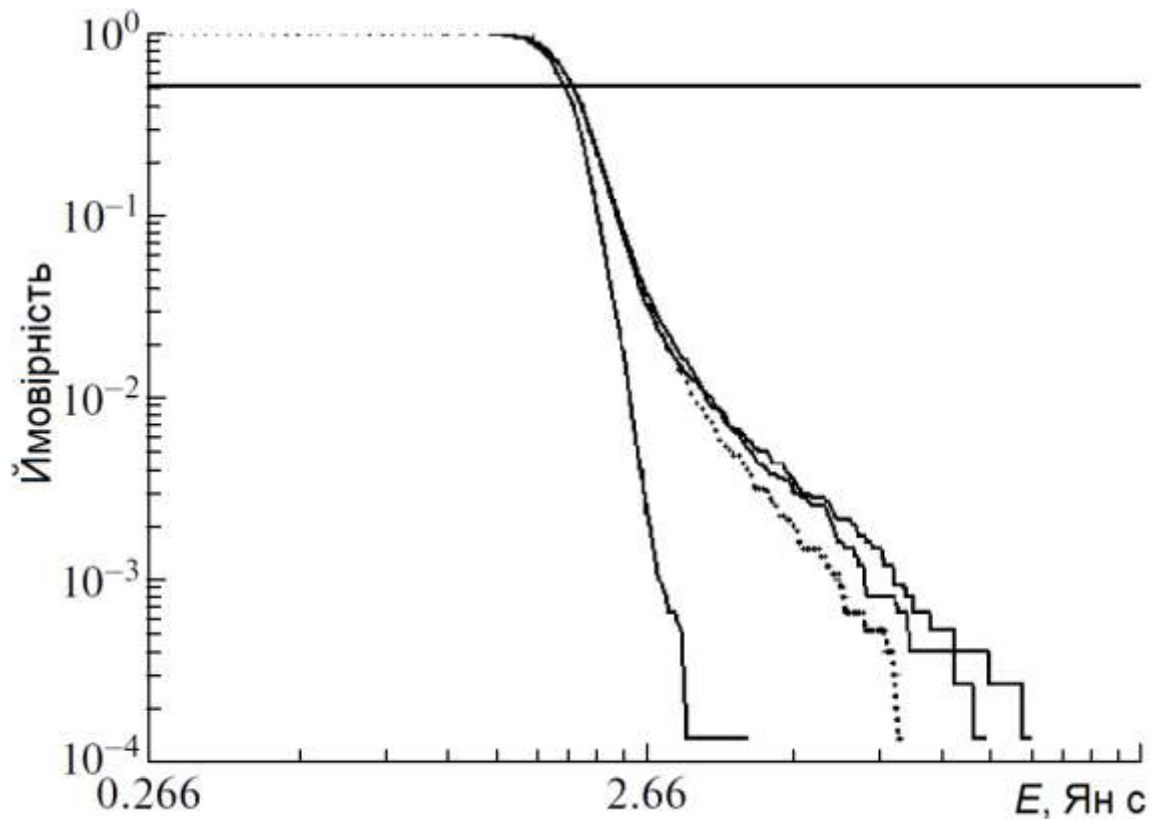


Рис. 1.3. Розподіли енергій радіоімпульсів пульсара PSR B0809+74 на 23.7 МГц [32].

RRAT, транзієнтне випромінювання НЗ. Джерела гамма-випромінювання, яке повторюється (Soft Gamma Repeaters – SGR) та аномальні рентгенівські пульсари (Anomalous X-ray Pulsars – AXP) мають багато спільного. Спектр радіовипромінювання деяких із них [33] може простягатися від десятків мегагерц до сотень гігагерц. Транзієнтні спалахи від RRAT [2] були виявлені як одиночні імпульси (стандартні Фур’є-алгоритми не показували наявності періодичності) і лише після детального дослідження були виявлені періоди обертання НЗ, які породжують це випромінювання. На рис. 1.4 зображені імпульси перших відкритих радіотранзієнтів, що обертаються. Всі продетектовані спалахи, що

перевищують пороговий рівень 5σ , позначені колами, розмір яких пропорційний співвідношенню «Сигнал/Шум» (С/Ш) даного спалаху. На осі абсцис показані часи приходу, на осі ординат – міри дисперсії. Завдяки їх скінченній ширині, інтенсивні спалахи виявлені на багатьох DM і формують вертикальне розширення цих особливостей. Для RRAT J1911+00, наприклад, характерний інтервал (не плутати з періодом обертання H3) повторів складає близько 3 год. Існують суперечливі дані про наявність RRAT-подібного випромінювання в XDINS [3, 34]. Пульсари із перемиканням режимів із «ON» (радіовипромінювання присутнє) в «OFF» (радіовипромінювання відсутнє) та назад [25] (пульсари «на півставки») також дають підстави для очікування прояву різних транзієнтних явищ у радіовипромінюванні «звичайних» радіопульсарів. Відносно нещодавно відкритий [26] «генетичний» зв'язок між рентгенівським пульсаром і радіопульсаром, що перейшов із першого стану в другий за кілька років, показує можливість появи нового типу транзієнтного або повторюваного випромінювання у відомого об'єкта. Можливо, що «перемикання» типів випромінювання відбувалося неодноразово або періодично, що пов'язано з наявністю речовини для акреції.

Інші джерела транзієнтного радіовипромінювання

Враховуючи не лише спостереження в низькочастотному діапазоні, але й широкі можливості спільних спостережень у різних частотних діапазонах, варто згадати й інші джерела транзієнтного радіовипромінювання. В роботі [13] поданий їх аналіз у сантиметровому й інших високочастотних діапазонах.

Рентгенівські подвійні зорі. Потужні спалахи радіовипромінювання з піковою щільністю потоку випромінювання під час викиду, яка в 10-100 разів перевищує потік випромінювання в стані спокою, вже давно спостерігаються в рентгенівських подвійних зір, таких як Лебідь X-3 [35, 36].

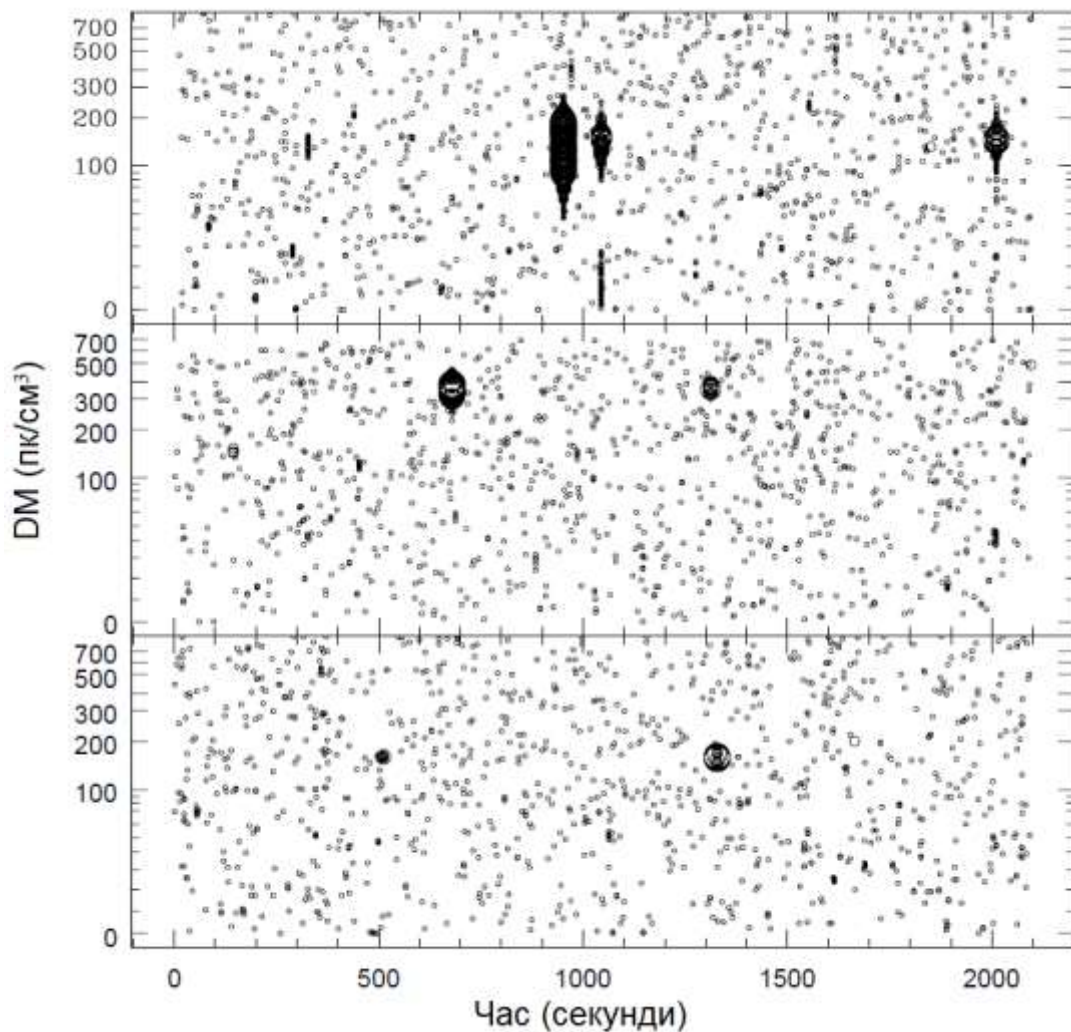


Рис. 1.4. Спострежні прояви нових (на момент публікації) радіотранзйєнтних джерел. Згори донизу показані перші детектування J1317–5759, J1443–60 і J1826–14 у даних Багатопроменевого огляду на Парксі [2].

Мазерні спалахи. Випромінювання від мазерів ОН може змїнюватися на часових масштабах порядку сотень секунд і детектуватися як тривалі сплески радіовипромінювання [37].

Активні ядра галактик. Спалахи від активних ядер галактик (AGN), зумовлені, ймовірно, поширенням ударних хвиль у релятивістських джетах, спостерігаються на міліметрових і сантиметрових хвилях [38].

Космічні промені ультрависоких енергій. Інтенсивні імпульси короткої тривалості (~ 1 нс) на частотах від кількох десятків до кількох

сотень мегагерц спостерігаються в результаті дії частинок ультрависоких енергій на земну атмосферу [39]. Високоенергетичні нейтрино, що діють на місячний реголіт, також можуть генерувати широкосмугові радіоімпульси [40].

Радіовипромінювання наднових. Припускається виникнення одиночного, потужного, широкосмугового, достатньо короткого (< 1 с) радіоімпульсу, який повинен випромінюватися в момент вибуху наднової [41].

Гамма-сплески (GRB). Післясвічення. У роботі [42] теоретично було показано, що гамма-сплески повинні мати супутні радіотранзїєнти. Вони спостерігаються в деяких GRB [43] у сантиметровому діапазоні.

Злиття НЗ. Джерела гравітаційних хвиль (ГХ). Досить давно була опублікована робота [44], у якій автори висловили таке припущення. НЗ у подвійних системах, що зливаються, ймовірно, можуть випромінювати радіоімпульси, що передують очікуваним гравітаційним хвилям. На момент написання дисертаційної роботи гравітаційні хвилі вже були відкриті [45]. 17 серпня 2017 року о 12:41:04 UTC (час злиття) за допомогою детекторів Advanced LIGO і Advanced Virgo спостерігалися гравітаційні хвилі від кандидата в подвійну нейтронну зорю, компоненти якої зливаються (пізніше об'єкт отримав назву GW170817). Fermi Gamma-ray Burst незалежно виявив гамма-спалах (GRB 170817A) із часовою затримкою ~ 1.7 с відносно моменту злиття. За допомогою сигналу гравітаційної хвилі джерело спочатку було локалізоване в області неба розміром 31 град² на оціночній відстані 40 ± 8 Мпк із масами компонентів, що співпадають із масами НЗ. Пізніше їх виміряли. Виявилося, що вони лежать у межах від 0.86 до 2.26 мас Сонця. Була запущена широка спостережна кампанія вздовж усього електромагнітного спектру, що призвело до відкриття яскравого оптичного транзїєнта AT 2017gfo у NGC 4993 (на відстані ~ 40 Мпк), менш, ніж через 11 годин після злиття на 1-метровому телескопі Swore. Оптичний транзїєнт був незалежно продетектований багатьма командами дослідників протягом доби.

Подальші спостереження були націлені на цей об'єкт і його околиці. Ранні УФ спостереження виявили транзієнт, що загасав протягом 48 годин. Оптичні й ІЧ спостереження показали його еволюцію протягом ~ 10 днів. Через ~ 9 та ~ 16 днів після злиття, відповідно, із положення даного транзієнта було відкрито рентгенівське та радіовипромінювання в більш низькочастотній частині спектру. Під час подальших спостережень не було знайдено жодного кандидата в джерела нейтрино та гамма-випромінювання ультрависоких енергій, які б відповідали положенню джерела ГХ. Ці спостереження підтверджують гіпотезу, що GW170817 був викликаний злиттям двох НЗ у NGC4993, після якого був короткий гамма-сплеск (GRB 170817A).

Анігілюючі чорні діри. Можлива поява радіотранзієнтів, що пов'язані з анігілюючими чорними дірами, як це було запропоновано в [46].

Швидкі радіоспаляхи (Fast Radio Bursts, FRB). У роботі [47] описано детектування короткого (< 5 мс) і потужного (30 Ян) сплеску під час проведення огляду пульсарів у Малій Магеллановій Хмарі (MMX) на 64-метровому радіотелескопі Паркс, Австралія. Сигнал був виявлений в архівних даних за 2001 рік із $DM = 375$ пк/см³ у даних трьох сусідніх променів телескопу та прийшов із напрямку, який розташований приблизно за три градуси від центру MMX. Даний імпульс має квадратичну частотно-часову залежність, що характерно для космічних сигналів, які пройшли через холодну іонізовану плазму міжзоряного середовища (рис. 1.5). Має місце розширення імпульсу в напрямку низьких частот. Дві білі лінії на відстані 15 мс одна від іншої «зв'язують» імпульс і показують очікуваний вигляд диспергованого при проходженні крізь холодну плазму сигналу, що припускає $DM = 375$ пк/см³. Також його інтенсивність збільшується в напрямку низьких частот, тобто щільність потоку $\propto f^{-4}$. Це все говорить на користь космічного походження даного сигналу. Були проведені пошуки (> 50 годин) імпульсів із того самого напрямку, проте їх знайдено не було. Велика галактична широта ($b = 41.8^\circ$) вкупі з високою DM роблять

малоймовірним галактичне походження сигналу. Існуюча модель розподілу вільних електронів [48] передбачає максимальну $DM = 25 \text{ пк/см}^3$ для цього напрямку. Не було опубліковано жодної інформації про гамма-сплески або вибухи наднових у тому напрямку та в час, близький до часу радіосплеску. Тому вважається, що джерелом спалаху є галактика, що розташована на відстані $\sim 600 \text{ Мпк}$. Враховуючи енергетику імпульсу, автори вважають, що це може бути або імпульс RRAT-а, або гігантський імпульс молодого та високоенергетичного або мілісекундного пульсара. Такий імпульс легко міг би породжувати багато імпульсів із нижчими енергіями як в оригінальних даних, так і в подальших спостереженнях. Отже, дуже ймовірно, що даний імпульс представляє собою новий клас радіоджерел. Згідно з даною роботою, частота появи таких сигналів оцінюється як $\sim 50 \text{ день}^{-1} \text{ Гпк}^{-3}$. Дане значення досить сильно відрізняється від оцінок частоти появи інших астрофізичних сигналів, таких як злиття нейтронних зір ($3 \text{ день}^{-1} \text{ Гпк}^{-3}$) і гамма-сплески ($4 \text{ день}^{-1} \text{ Гпк}^{-3}$) та значно менше за частоту вибухів наднових ($1000 \text{ день}^{-1} \text{ Гпк}^{-3}$). Хоча вказане значення порівняне з аналогічною оцінкою для гамма-сплесків, радіочастота та яскрава температура цього спалаху значно вища, ніж для обговорюваних зараз механізмів короткотривалого радіовипромінювання від цих джерел. Станом на даний час було зареєстровано 33 такі сигнали, причому один із них повторився (прийшов ще один із того самого напрямку). Через 9 років після відкриття швидких радіоспалахів, був презентований їх онлайн-каталог – FRBCAT [49]. Він включає інформацію про інструменти, використані при детектуванні кожного спалаху, виміряні величини з кожного спостереження та модельно-залежні величини, отримані зі спостережних параметрів. Каталог розміщений у мережі Інтернет як база даних Mysql і може бути завантажений у різних форматах для використання оффлайн. Автори стверджують, що ця база даних буде існувати в загальному доступі для використання науковою спільнотою при дослідженні популяції FRB із її зростанням.

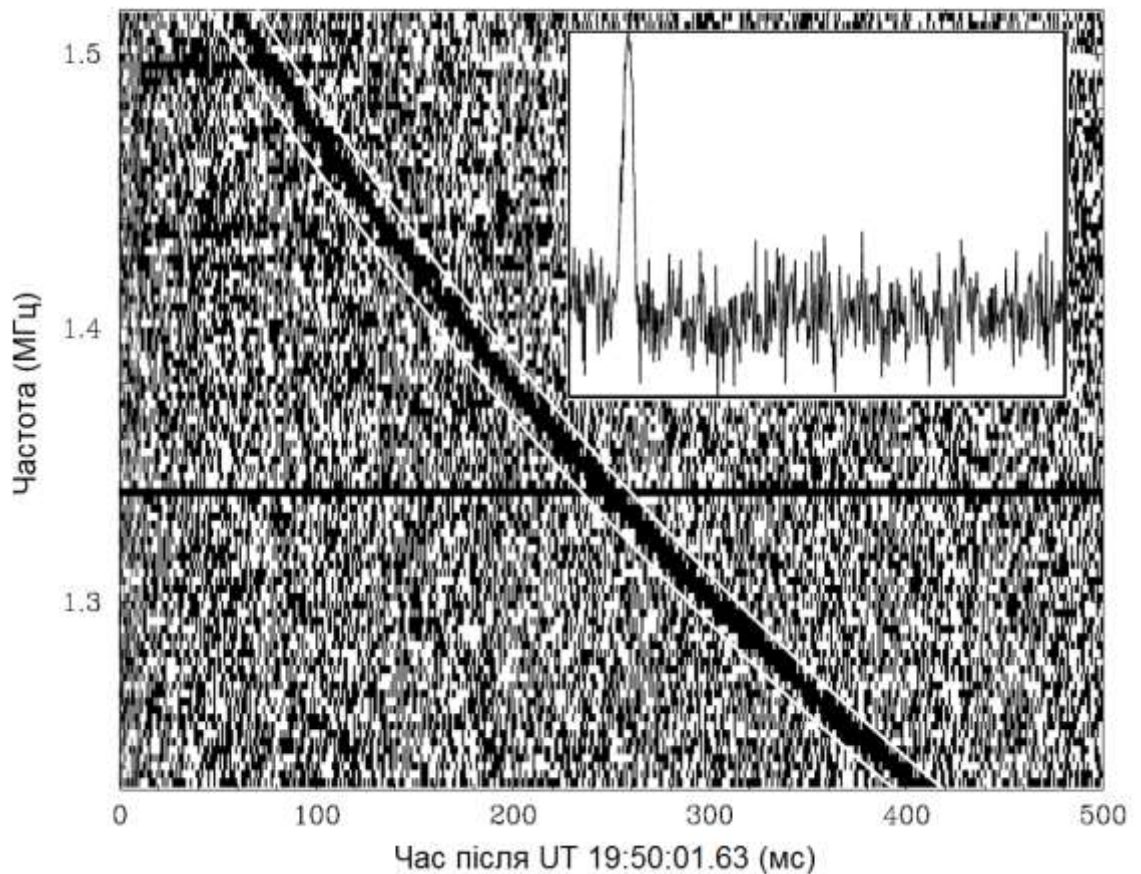


Рис. 1.5. Частотна еволюція та інтегрований профіль імпульсу. Спостережні дані, отримані 24 жовтня 2001 року, показані у вигляді псевдо-3-вимірного графіка (інтенсивність як функція частоти – час). Дисперсію чітко видно як квадратичне запізнення сигналу на нижчих частотах, порівняно з вищими [47].

Варто підкреслити, що ефекти поширення також впливають на транзйентні сигнали, які в деяких випадках, імовірно, тісно пов'язані з об'єктами, що випромінюють (як у випадку мазерів або, можливо, ГІ пульсарів [50]). Крім того, можна припустити, що існують інші класи джерел. Їх виявленню буде сприяти проведення повних оглядів Північного та Південного неба з метою визначення положення джерел повторюваного радіовипромінювання, а також моніторингові програми та спільна робота інструментів різних діапазонів довжин хвиль. При цьому обсерваторії, оснащені високочастотними інструментами (від гамма-діапазону до оптичного), можуть сигналізувати про початок яких-небудь швидких

перехідних процесів у космічних об'єктів для продовження спостережень у низькочастотних областях спектру.

1.2. Спостереження пульсарів і транзієнтних джерел на високих частотах радіодіапазону

Спостереження спалахуючих об'єктів на різних частотах радіодіапазону є дуже важливою задачею. Воно потребує високої чутливості, великого поля зору та багатопроменевості. В роботі [51] автори розглядають проблеми, що мають місце при проведенні пошуків швидких радіотранзієнтів. Описуються переваги використання для таких досліджень радіотелескопу SKA, який наразі будується. Автори роботи [9] провели ряд моделювань, метою яких було оцінити здатність SKA виявляти пульсари (і які параметри спостережень є оптимальними для цього) та зробити оцінки кількостей потенційно доступних таких джерел для спостереження за допомогою SKA1-LOW і SKA1-MID.

У [52] були проаналізовані часові залежності часів прибуття імпульсів і частоти детектування імпульсів восьми радіотранзієнтів, що обертаються із огляду Parkes Multibeam Pulsar Survey (далі – PMPS), а автори [53] описують спостереження цих джерел, які були відкриті при повторній обробці даних PMPS. Результати пошуку транзієнтних радіоспалахів в архівних оглядах пульсарів ($5^\circ < |b| < 30^\circ$) за допомогою приймача Паркса, представлені в [54]. Основним результатом є подібність розподілів імпульсів RRAT розподілам сигналів звичайних пульсарів. До слова, автори [55] безпідставно вважають RRAT окремим класом пульсарів, основною відмінною рисою яких є наявність спорадичних радіоспалахів.

У [56] автори намагалися знайти транзієнтні/змінні радіоджерела за допомогою прототипу Murchison Widefield Array (MWA), проте радіотранзієнти не були виявлені. Також на MWA був проведений огляд спорадичних і змінних джерел [57], але кандидати у транзієнти не були знайдені й тут.

Автори роботи [58] відкрили 21 RRAT у даних пульсарного огляду North Celestial Cap та Скануючого пульсарного огляду на GBT (Green Bank Telescope) завдяки новому алгоритму для обробки даних. Крім того, дослідники вважають RRAT і звичайні пульсари різними проявами тих самих джерел.

У роботі [59] представлені результати спостережень 44 відомих пульсарів на LongWavelengthArray (LWA1 – перша станція). Показано профілі 44 пульсарів, виміряні міри дисперсії (які, здебільшого, близькі до отриманих на УТР-2 у [60], також наведено порівняння зі значеннями з каталогу ATNF [61]), щільності потоків тощо. А в роботі [62] автори представляють результати спостережень 19 відомих RRAT теж на LWA1 (частоти – 30-88 МГц), із яких були виявлені два джерела. Були виміряні та порівняні з отриманими на більш високих частотах їх періоди, профілі імпульсів, міри дисперсії і т. д.

У [63] автори описують детектування 48 мілісекундних пульсарів (МСП) на радіотелескопі LOFAR (110-188 МГц). Тут наводяться ширини імпульсів пульсарів, щільності потоків та інші параметри, а також порівняння отриманих результатів із отриманими раніше на вищих частотах. Автори [64] представляють перші результати перепису непідкручених пульсарів, що спостерігалися на LOFAR, надають міри дисперсії, профілі імпульсів, щільності потоків і т. д.

В роботі [65] був здійснений сліпий пошук радіотранзєнтів в оглядах GLEAM (200 МГц) і TGSSADR1 (147.5 МГц). Представлений один кандидат, що має щільність потоку 304 мЯн на частоті 147.5 МГц, проте в інших архівних даних і при подальших спостереженнях він виявлений не був.

1.3. Значущість дослідження транзєнтів у найнижчій частині радіодіапазону

Оскільки дане дослідження проводиться на радіотелескопі УТР-2, то в цій частині розділу мова йтиме про спостережні прояви вищеописаних джерел у декаметровому діапазоні.

Найбільш дослідженими серед імпульсних джерел радіовипромінювання є, безперечно, пульсари. Їх дослідження в декаметровому діапазоні проводиться вже більше 40 років [66]. У перші роки спостережень були виявлені десять пульсарів [67, 68]. У подальшому, незважаючи на істотне розширення досліджень характеристик пульсарів (відкриття ГІ пульсара в Крабі на декаметрових хвилях [69], відкриття явища АП [31], дослідження поведінки субімпульсів [70] тощо), кількість зареєстрованих пульсарів у цьому діапазоні не збільшувалася.

До чинників, що ускладнюють дослідження в декаметровому діапазоні, можна віднести великий час розсіяння, який розширює імпульси настільки, що імпульсна послідовність перетворюється на безперервне випромінювання з одночасним ослабленням максимумів інтенсивності. Слід також згадати про дисперсійну затримку (яка, однак, легко враховується при записі сигналів із великою часовою та/або частотною роздільною здатністю), а також про високу температуру галактичного фону та складну завадову обстановку. Велика інформативність низькочастотного діапазону досягається за рахунок подолання вищезгаданих труднощів при проведенні досліджень [71, 72].

Але при спостереженні пульсарів даний діапазон також має помітні переваги перед високочастотним. Зростання точності визначення (зі зниженням частоти) міри дисперсії (DM) і міри обертання (RM) (квадратичні залежності) та сталої часу розсіяння радіовипромінювання (~ 4 степінь частоти) дає можливість значно точніше вимірювати ці параметри. Наприклад, помилка в DM порядку 0.01 пк/см^3 дає значний відклик у співвідношенні «Сигнал/Шум» (С/Ш) при операції усунення дисперсії. З одного боку, це дозволить уточнити окремі характеристики пульсарів, а з іншого – є чутливим інструментом для аналізу варіацій електронної щільності або магнітного поля на промені поширення сигналів. Задача дослідження міжзоряного середовища за допомогою спостережень досить потужних пульсарів у декаметровому діапазоні становить окремий інтерес.

Високочастотний діапазон дозволяє здійснювати пошуки пульсарів у напрямках великої електронної щільності та, відповідно, міри дисперсії. Так, відносно недавно були виявлені три пульсари на частоті 6.5 ГГц поблизу центру Галактики [73]. Низькочастотний діапазон є підходящим для надійного детектування пульсарів і особливо – одиночних транзієнтних сигналів на фоні широкосмугових завад. Повною мірою це було використано в роботі з пошуку RRAT-подібного випромінювання XDINS [74]. Труднощі у виділенні імпульсів пульсарів із малою DM і достатньо широким вікном головного імпульсу на фоні широкосмугових завад пояснюються мізерністю дисперсійної затримки на високих частотах. На рис. 1.6 наведено розрахунковий час запізнення сигналів на частотах, що рознесені на 10 МГц, при середній частоті від 100 до 300 МГц для пульсара з $DM = 10 \text{ пк/см}^3$. Якщо припустити, що ширина імпульсу на половинній потужності складає 100 мс, то на частотах вище 200 МГц дисперсійна затримка між каналами за часом буде меншою за ширину імпульсу. Тому точний розрахунок DM достатньо складний.

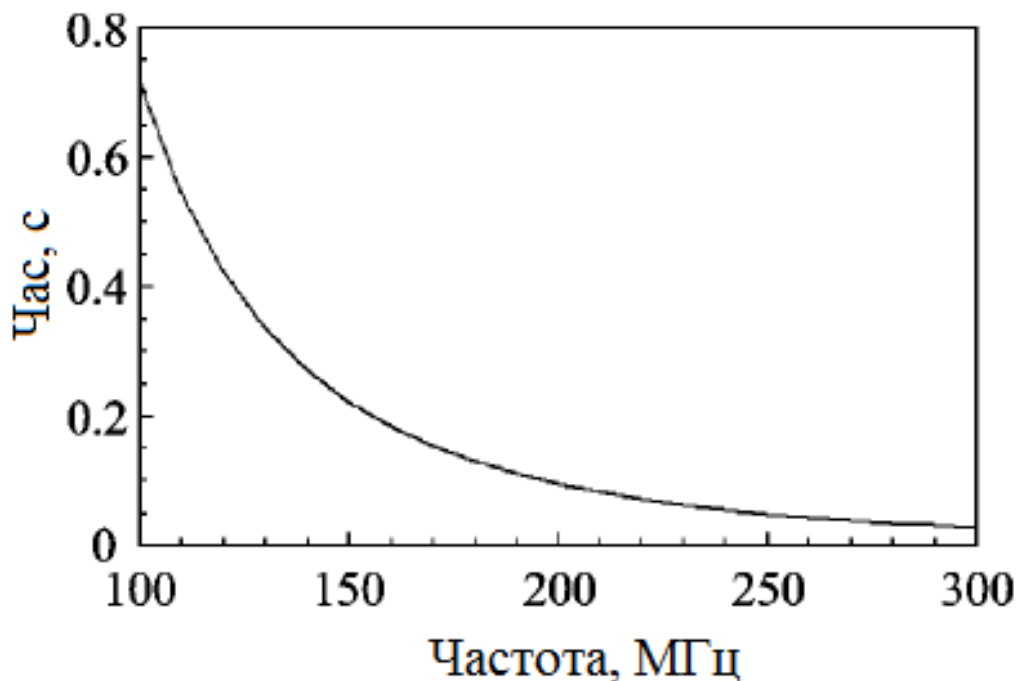


Рис. 1.6. Запізнення сигналів на частотах, що рознесені на 10 МГц, при середній частоті від 100 до 300 МГц для модельного пульсара з

$DM = 10 \text{ пк/см}^3$. При ширині імпульсу $\Delta W = 100 \text{ мс}$ на частотах вище 200 МГц дисперсійний зсув каналів за часом буде меншим, ніж ΔW [12].

Для декаметрового діапазону з шириною смуги реєстрації порядку октави, розрахунок показує, що будь-який, навіть найближчий за астрономічними мірками одиночний імпульс (за наявності субмілісекундних варіацій) буде надійно відрізнятися від завади. Це дає впевненість у тому, що будь-яке RRAT-подібне випромінювання, що перевищує поріг виявлення, буде зареєстроване.

Низькочастотний діапазон цікавий також тим, що існують певні передумови для збільшення кількості пульсарів, які принципово можуть бути продетектовані саме тут. Це пов'язано з розширенням імпульсу власне пульсарів у напрямку низьких частот, більшими кутами розсіяння на низьких частотах у середовищі поширення, появою широкого, низькоінтенсивного «плато» імпульсу в деяких пульсарів у низькочастотному діапазоні [75].

Остання обставина не є тривіальною та підлягає ретельному дослідженню. Вказівки на наявність такого «плато» були зроблені досить давно. Однак модернізація радіотелескопа УТР-2 й установка широкосмугового обладнання дозволила надійно зареєструвати широкий підйом інтенсивності (величиною до кількох процентів від максимуму головного імпульсу) в області порядку сотні градусів за довготою довкола вікна головного імпульсу. На рис. 1.7 наведений профіль середнього імпульсу пульсара PSRB0809+74 з чотирма періодами для ілюстрації наявності широкого «плато» за межами головного імпульсу.

Наявність даної особливості відзначено ще в кількох пульсарів. Якщо це не є унікальним явищем, то слід очікувати детектування в декаметровому діапазоні тих пульсарів, промінь яких направлений до спостерігача так, що виявлення їх на високих частотах є неможливим. Кількість подібних пульсарів може бути значною і їх детектування залежатиме від чутливості, що досягнута при проведенні спостережень.

Таким чином, у декаметровому діапазоні можна очікувати не лише збільшення кількості пульсарів, але й, можливо, збільшення переліку їх різновидів, залежно як від активності, так і від ширини вікна головного імпульсу.

Яскраво продемонструвала можливості та перспективи дослідження пульсарів і транзієнтних джерел у декаметровому діапазоні (і безпосередньо на радіотелескопі УТР-2) робота [60]. Автори описують складнощі спостережень в декаметровому діапазоні (найнижчі частоти, доступні для наземних спостережень – 10–30 МГц): сильні ефекти поширення в МЗС (розсіяння, дисперсія) та в іоносфері (мерехтіння та рефракція), а також земні завади та фоновий шум Галактики. Тим не менше, можливо виміряти параметри міжзоряної плазми (вплив якої росте як довжина хвилі у степені 4 і більше), а також спектр і профіль імпульсу на низьких частотах більш точно. До цієї роботи на таких низьких частотах було успішно продетектовано лише ~ 10 пульсарів, проте нещодавнє (на момент проведення цього дослідження) оновлення приймачів на УТР-2 значно підвищило його чутливість і сприяло проведенню нового пошуку імпульсного радіовипромінювання. В даній роботі був проведений огляд відомих пульсарів зі схиленням більше -10° та мірою дисперсії менше 30 пк/см^3 , тобто вибірка склала 74 близькі джерела. Метою було продетектувати пульсари, що не спостерігалися раніше в декаметровому діапазоні та/або виявити чинники, які не дозволяють цього зробити. В результаті було виявлено випромінювання 40 пульсарів (55% від вибірки). Відповідно, 30 із них спостерігалися в декаметровому діапазоні вперше. Були пораховані параметри їх середніх профілів, включаючи внутрішнє розширення імпульсу (не через міжзоряне розсіяння) зі зниженням частоти. Також були виявлені два пульсари із $DM > 30 \text{ пк/см}^3$: B0138+59 із $DM \approx 35 \text{ пк/см}^3$ та B0525+21 із $DM \approx 51 \text{ пк/см}^3$.

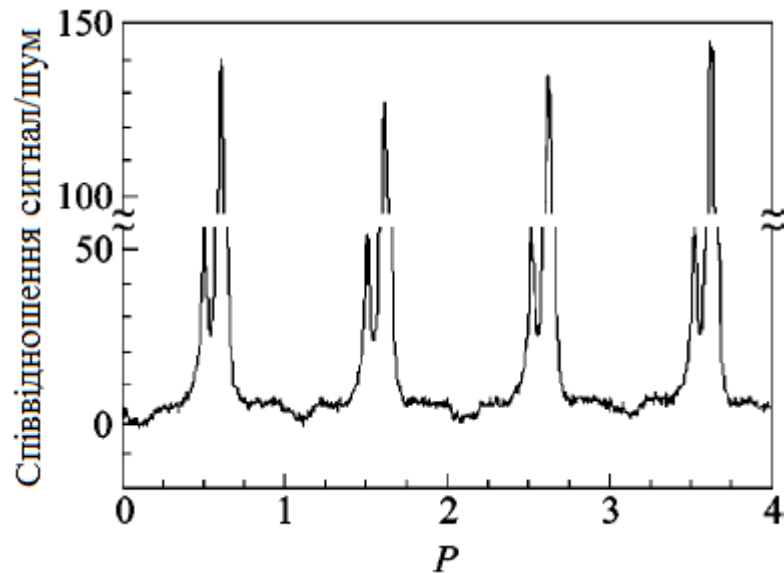


Рис. 1.7. Ілюстрація наявності широкого «плато» за межами головного імпульсу: профіль середнього імпульсу пульсара PSRB0809+74 з чотирма періодами P [12].

Внутрішнє розширення імпульсу було екстрапольоване в [60] на частоти 25 і 100 МГц, використовуючи параметри та пульсари з [76]. На рис. 1.8 ці дані позначені товстими хрестиками. Автори порахували, що відносне розширення імпульсу на 25 МГц порівняно зі 100 МГц лежить у межах 1.3–2.6 разу. Для того, щоб це зробити, було оцінене та відняте розширення за рахунок розсіювання в МЗС із ширини $W_{0.5}$ (FWHM). Автори вважають, що якщо для τ розсіювання були отримані верхні оцінки, то правильні значення $W_{0.5}$ можуть бути недооцінені. На рис. 1.8 ці оцінки з вимірювань УТР-2 позначені тонкими хрестиками. Жирними хрестиками позначені екстрапольовані з параметрів, отриманих у [76], пульсари B0301+19, B0329+54, B0525+21, B1133+16, B1237+25, B2020+28 і B2045–16. Тонкі хрестики відповідають спільним пульсарам для [76] та [60] (B0525+21, B1133+16, B1237+25), ромби – інші пульсари з [59]. Оцінки для цих трьох відповідних пульсарів дещо нижчі (на 5–15%), ніж відносна ширина, отримана в [76] і це узгоджується з припущенням авторів про недооцінку коригованої ширини імпульсу на низьких частотах. Однак майже в усіх

пульсарів було виявлене істотне розширення імпульсу (в середньому – в 1.8 разу, при стандартному відхиленні 0.7). За винятком кількох рідкісних випадків, для яких профіль імпульсу стає вужчим у напрямку низьких частот (НЧ) (рис. 1.8), більшість профілів розширюються в напрямку НЧ. Це дає підстави вважати, що кількість видимих джерел імпульсного та транзієнтного радіовипромінювання повинна збільшуватися на низьких частотах. У [60] були продетектовані, як зазначалося раніше, 40 пульсарів із $DM = 0 \div 30$ пк/см³, $\delta = -10-90^\circ$ та періодом більшим, ніж 0.1 с. Автори підтвердили, що конус випромінювання розширюється на НЧ (рис. 1.8), тому на нижчих частотах промінь пульсара з більшою ймовірністю перетне Землю, ніж на вищих. Якщо оцінити розмір цього конусу як 1.5 (промінь на 25 МГц на 50% ширший, ніж на 100 МГц), то можна очікувати детектування майже 20 нових джерел тільки періодичного випромінювання (а спорадичного – значно більше, див. оцінки величин різних популяцій нейтронних зір у [5]), які невидимі на вищих частотах.

Як вже зазначалося, в декаметровому діапазоні доступна висока роздільна здатність за DM, а отже, за відстанню. Це особливо яскраво проявляється в можливості відрізнити земні широкосмугові завади від найближчих (за астрономічними мірками) сигналів – електростатичних розрядів на планетах Сонячної системи. Значення DM при цьому складає $\sim 10^{-6}$ пк/см³. З іншого боку, спостереження одиночних транзієнтів при використанні режиму «waveform» і експозиціях до однієї години на частоті 30 МГц доступні для джерел із $DM > 1000$ пк/см³ і сталою розсіяння $\tau > 1500$ с [48]. Такі параметри відповідають відстаням порядку або більше розміру Галактики (залежно від координат джерела). Це означає, що можливо зареєструвати RRAT-подібне випромінювання великої кількості об'єктів. Різні оцінки (залежно від чутливості, що досягнута при огляді) припускають можливість детектування до 20 тис. об'єктів подібного типу. Це можуть бути як об'єкти Галактики, так і позагалактичні джерела

радіовипромінювання, наприклад, крабоподібні пульсари в найближчих галактиках або скупченнях галактик.

Спостереження післясвічення GRB також може виявитися результативним, особливо при розширенні смуги спостережень у метрову частину діапазону (при використанні LOFAR і ГУРТ). При зростанні частоти, досяжні відстані за червоним зміщенням z зростають у кілька разів і попередні розрахунки показують можливість реєстрації сигналів на відстані до $z = 1-2$.

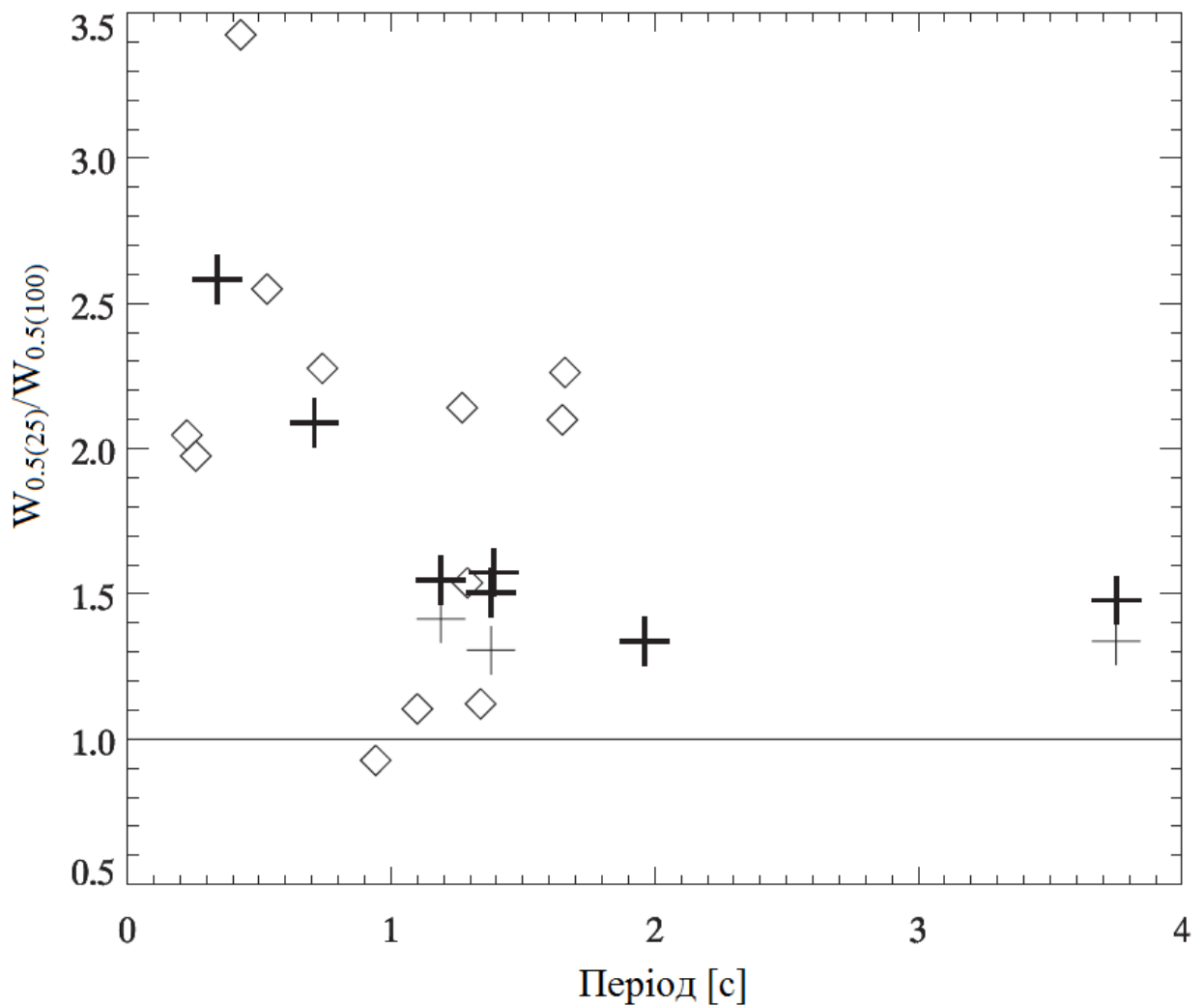


Рис. 1.8. Відносне розширення повної ширини профілю на половині максимуму інтенсивності (FWHM) між частотами 25 і 100 МГц як функція періоду [60].

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

У даному розділі був проведений оглядовий аналіз існуючих джерел транз'єнтного випромінювання. Розглянуті та проаналізовані труднощі, задачі та особливості обробки даних при пошуку транз'єнтних сигналів. Також були наведені й розглянуті огляди пульсарів і спорадичних джерел на більш високих частотах.

Пошук транз'єнтних сигналів є значно складнішим, ніж повторюваних. Скажімо, при обробці даних огляду на Парксі одразу була знайдена велика кількість пульсарів, проте на виявлення транз'єнтних сигналів пішло значно більше часу й вони були знайдені пізніше. Це свідчить про складність такої обробки даних, як і виявлення одиночних сигналів у великих масивах спостережних даних і виділення таких імпульсів на фоні завад. Даний факт необхідно враховувати при пошуку транз'єнтів, особливо в тому випадку, якщо заплановано провести повний огляд всієї доступної частини неба (що автоматично вимагає обробки дуже великої кількості даних та пошуку серед них індивідуальних сигналів).

Таким чином, задачі даної роботи будуть такими. По-перше, слід розробити методику пошуку транз'єнтних сигналів. Необхідно розробити відповідні програми, виробити і сформулювати критерії для виділення корисних сигналів на фоні радіочастотних завад. По-друге, оскільки довести космічну природу кожного окремого сигналу буде дуже складно, то, ймовірно, потрібно буде спиратися на їх спільні ознаки та за розподілами їх параметрів вже робити висновки про природу знайдених імпульсів.

Проведення подібного огляду в декаметровому діапазоні ускладнене його особливостями. Це потрібно враховувати при роботі на цих частотах. Оскільки у автора є можливість працювати на найбільшому у світі радіотелескопі декаметрового діапазону довжин хвиль, то цілком виправданим і логічним було провести повний огляд Північного неба саме на даному інструменті.

Основні положення цього розділу викладені в публікаціях автора [10, 71, 72, 75].

РОЗДІЛ 2

ПАРАМЕТРИ ОГЛЯДУ ПІВНІЧНОГО НЕБА. МЕТОДИ ТА ІНСТРУМЕНТИ СПОСТЕРЕЖЕНЬ, ОБРОБКА ДАНИХ

У даному розділі мова йтиме про інструменти, програми, методи й алгоритми обробки даних Огляду. В роботі [60] було експериментально доведено, що імпульс пульсара розширюється на низьких частотах, порівняно з більш високими (ширина на 25 МГц і 100 МГц відрізняється приблизно у два рази). В попередньому розділі було розглянуто широке розмаїття потенційно доступних для спостереження в декаметровому діапазоні джерел транзієнтного випромінювання. Тому є всі підстави для проведення повного огляду Північного неба з метою пошуку джерел спорадичного радіовипромінювання на низьких частотах.

Описані розроблені нові та вдосконалені існуючі програми й алгоритми обробки даних Огляду. Особлива увага приділена перевірці космічного походження знайдених сигналів.

У першій частині розділу описана використана апаратура, інструменти та загальні аспекти проведення Огляду. Друга частина присвячена обробці спостережних даних. Вона включає в себе опис алгоритмів для усунення слідів радіочастотних завад і програм для компенсації дисперсійного запізнення сигналу на низьких частотах по відношенню до високих. Також тут описані методи та програми виявлення індивідуальних імпульсів у спостережних даних і перевірка працездатності розроблених алгоритмів на відомих пульсарах.

Висновки за розділом наведені в його заключній частині.

2.1. Інструменти та параметри огляду Північного неба

Раніше на УТР-2 вже було проведено огляд компактних джерел випромінювання [77, 78 і посилання в ній], але в даній роботі

використовується інший підхід, пов'язаний із відсутністю ефекту сплутування для пульсарів і транзієнтів завдяки великій роздільній здатності за третьою координатою – відстанню від спостерігача. Це відбувається завдяки широкому відносному діапазону частот радіотелескопа УТР-2 і можливості дуже точно визначати залежність і величину дисперсійної затримки індивідуальних або усереднених імпульсів.

Слід зазначити, що при пошуку спорадичних сигналів у декаметровому діапазоні істотно зростають вимоги до засобів спостереження. По-перше, через мінімальні можливості накопичення сигналу за часом ефективна площа телескопів має бути якомога більшою. Крім того, розмір об'єктів (швидкість світла, помножена на характерний часовий масштаб варіацій, що спостерігаються) накладає фундаментальні обмеження на максимум енергії, яка виділяється у випромінюючій області, що також призводить до необхідності підвищення чутливості для збільшення кількості спостережуваних об'єктів і їх класів. По-друге, для компенсації ефекту поширення – диспергування (залежності швидкості поширення від частоти) транзієнтного сигналу в середовищі, необхідною є якомога вища частотна роздільна здатність. Ця вимога грає особливо важливу роль у низькочастотному діапазоні. По-третє, визначення просторового положення джерел транзієнтного випромінювання вимагає високої кутової роздільної здатності, а доцільність одночасного спостереження багатьох джерел – більшого поля зору телескопа.

Також існують інші специфічні вимоги, які варто згадати. Необхідність збереження високої часової, частотної та просторової роздільної здатності вимагає збільшення на порядки швидкості запису, передачі, обробки та дискового простору для зберігання даних. Слід відзначити ще один фактор, що грає важливу роль на всіх частотах спостережень: радіозавади мають дуже широкий діапазон потужностей і часових варіацій. Необхідність виділення на їхньому фоні дійсно радіоастрономічних сигналів потребує застосування високолінійних аналогових схем і значних витрат

обчислювальних потужностей для подальшої фільтрації. Методом виділення корисних сигналів на фоні завад є також проведення спостережень на різних телескопах, які рознесені в просторі. Локальні завади по-різному відображаються в різних пунктах спостережень, що дозволяє досить впевнено їх придушувати. Однак і при цьому подолання впливу іоносфери, спільне калібрування й обробка даних є складною науковою задачею.

2.1.1. Визначення цілей і задач огляду Північного неба

Визначення цілей і задач Огляду, враховуючи існуючі можливості, отримані результати подібних оглядів і досвід їх проведення, є дуже важливим. Необхідно знайти компроміс між повнотою покриття видимої частини неба, досяжною чутливістю до радіовипромінювання, прогнозованими результатами та ресурсами, що витрачаються.

При огляді півсфери (більше 20 тис. кв. градусів) і часі накопичення у промені (візьмемо його рівним 0.25 кв. градуса) 1 година, необхідно витратити ~ 80000 год або близько 10 років безперервних спостережень, що автоматично виключає телескоп із інших наукових програм. Тому звичайною практикою найбільш результативних оглядів із покриттям усього або більшої частини доступного «радіонеба» є використання багатопроменевих (багаторупорних) антен і розподіл часу залежно від очікуваних результатів [79-82]: у площині Галактики – більше, у напрямку полюсів – менше. Багаторупорні антени установлені в обсерваторіях Паркс, Аресібо й Еффельсберг. При достатньому часі, який виділений на задачу огляду, як у випадку з радіотелескопом Грін-Бенк під час ремонту азимутального круга, успішно може використовуватися й один промінь [83].

Тоді огляд здійснювався в транзитному режимі. Це істотно обмежувало час накопичення сигналів (при ширині променю близько 35' він складав порядку 135 с). Однак і в цьому режимі були відкриті десятки пульсарів у Північному небі, що показало істотні пробіли в оглядових спостереженнях. Не дуже давно проводилися повні огляди неба за допомогою телескопів на

обсерваторіях Паркс і Еффельсберг за однаковою програмою. Накопичення сигналів у напрямках на диск Галактики складало близько 20 хв, а поза диском – 1 хв. Враховуючи досить високу частоту, на якій проводилися спостереження (1.4 ГГц), можна стверджувати, що в близьких джерел, які розподілені по небу досить рівномірно та мають доволі спорадичний характер випромінювання, мало шансів бути виявленими.

Стратегії пошуку транзйєнтів можуть бути різними: від тривалого накопичення сигналів від певного джерела до швидкого картографування всього неба. Якщо об'єкт відомий, як у випадку пошуку радіовипромінювання екзопланет або електростатичних розрядів на планетах Сонячної системи, то буде використовуватися слідування (супровід) за передбачуваним джерелом. Навпаки, картографування з малими експозиціями та високою кутовою роздільною здатністю, дозволяє фіксувати радіотранзйєнти в широкому полі огляду. Це може бути застосовано для пошуку потужних джерел, наприклад, післясвічення GRB. Як компроміс може бути використаний широкий промінь прийомної антени. При цьому роздільна здатність за координатами в картинній площині буде невисокою. Але DM і характерний час сигналу дозволять оцінити відстань до об'єкту, енерговиділення та, ймовірно, природу джерела.

Для пошуку пульсарів і RRAT спочатку здійснюється пошук кандидатів. Уточнення координат та інших характеристик буде проводитися при подальших спостереженнях.

Оскільки спостереження в даному огляді проведені в декаметровому діапазоні довжин хвиль (найнижчий частотний діапазон електромагнітного спектру, доступний для наземних спостережень), то корисні сигнали спотворені сильним впливом ефектів поширення, збурені іоносферою та забруднені численними радіочастотними завадами. На декаметрових хвилях досягти гарної просторової роздільної здатності (що визначається як λ/D , де λ – довжина хвилі, а D – розмір апертури антени) можна лише маючи

надзвичайно велику антенну решітку. Великі антенні решітки є дуже складними інструментами, їх калібровка потребує багато часу.

Радіоастрономічні сигнали набагато слабші, ніж природні та штучні земні завади. Якщо є можливість – використовується накопичення, але одиночні (чи транзйєнтні) сигнали дуже складно накопичувати навіть за частотою, оскілки частотна залежність дисперсії є чи не найважливішим свідченням про космічну природу випромінювання. Тобто тільки велика чутливість (що залежить від ефективної площі) може забезпечити якісно нові результати пошуку транзйєнтних явищ. Більше того, їх дослідження в низькочастотному діапазоні ускладнюється різними негативними факторами, такими як сильні ефекти поширення в міжзоряному середовищі й іоносфері Землі та потужні земні завади. Всі вищезгадані фактори слід взяти до уваги при дослідженні таких слабких астрофізичних джерел, як пульсари та транзйєнти.

УТР-2, будучи одним із найбільших існуючих радіотелескопів, має мінімальну ширину діаграми спрямованості антени основного променя $\sim 30'$. Це означає, що променем захоплюється досить велика площа неба, яка, крім об'єкта, що цікавить спостерігача, може містити й інші джерела випромінювання. Таким чином, даний радіотелескоп є ідеальним інструментом для проведення подібного огляду.

2.1.2. Концепція та параметри огляду Північного неба на УТР-2

Основним завданням радіотелескопу УТР-2 було створення каталогу джерел Північного неба в декаметровому діапазоні. Конфігурація телескопу обиралася таким чином [84], щоб досягти досить високої просторової роздільної здатності. При цьому багатопроменєвість (5 променів антени «Північ – Південь») була закладена в проект із самого початку для врахування впливу рефракції в іоносфері. Два «ножових» промені двох антен можуть формувати вузький «олівцевий» промінь при перемноженні. Останнє здійснюється відповідно до формули $(U_1+U_2)^2 - (U_1-U_2)^2 = 4U_1U_2$, а сума та

різниця сигналів антен «Північ – Південь» (U_1) і «Захід – Схід» (U_2) отримані за допомогою сумарно-різницевого гібридних пристроїв.

Проведення спостережень за допомогою сумарного, різницевого та перемноженого сигналів двох «ножових променів» дає можливість запропонувати нову концепцію огляду, використовуючи практично повну відсутність ефекту сплутування для пульсарів і транзієнтних сигналів [12]. Відмінність запропонованого скануючого огляду (що використовує обертання Землі) від схожого огляду джерел на УТР-2 полягає у використанні сумарного, а не перемноженого променю. Це дає істотний вигоду у часі проведення спостережень і другу, не менш важливу перевагу: з метою підвищення чутливості використовується накопичення сигналів під час проходження джерела через увесь «ножовий» промінь антени «Північ – Південь». Центри п'яти променів радіотелескопу, зсунуті системою формування променів на $30'$ із Півдня на Північ, знаходяться в площині локального меридіану. Як показує розрахунок, модельне джерело в діапазоні часових кутів ± 0.5 год практично не виходить за межі діаграми направленості одного з п'яти променів антени «Північ – Південь». При виході такого джерела за межі одного з променів можна скористатися даними сусіднього променю, які синхронізовані між собою. Ширина променю та відстань між їх центрами складає близько 0.5° .

Дане дослідження використовує обертання Землі для того, щоб просканувати все доступне Північне небо п'ятьма променями УТР-2 і покрити діапазон схилень від -10° до 90° (рис. 2.1). Як вже було зазначено, замість використання вузьких променів антенної діаграми (що отримана шляхом множення двох сигналів антен (рис. 2.2, зліва), Огляд записаний у широких поперечних променях суми антен «Північ – Південь» («Пн – Пд») і «Схід – Захід» («Сх – Зх») (рис. 2.2, центр), що забезпечує дуже велике поле зору телескопа та збільшує ймовірність детектування, в першу чергу, спорадичних сигналів.

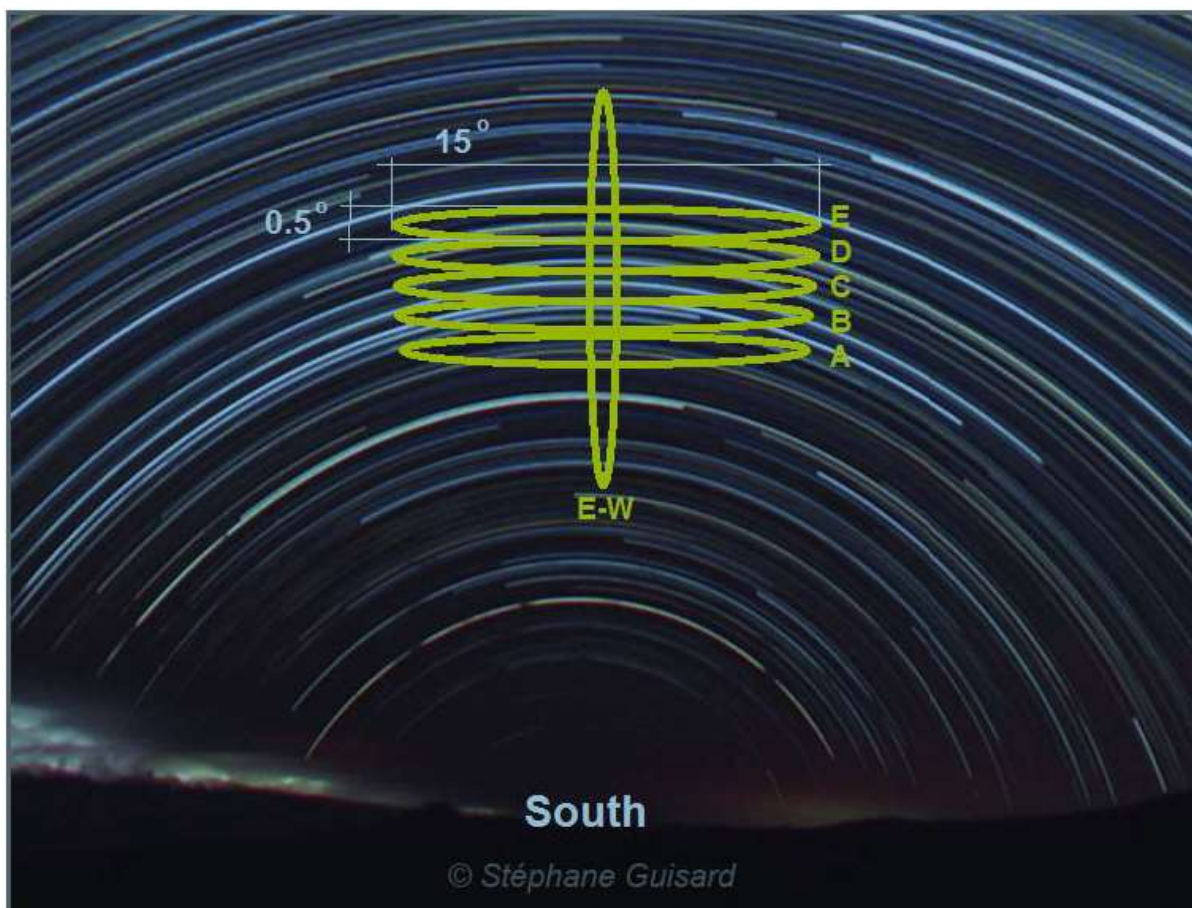


Рис. 2.1. П'ять променів антени «Пн – Пд» (А, В, С, D, Е) та промінь антени «Сх – Зх» УТР-2, наведені на небесний меридіан.

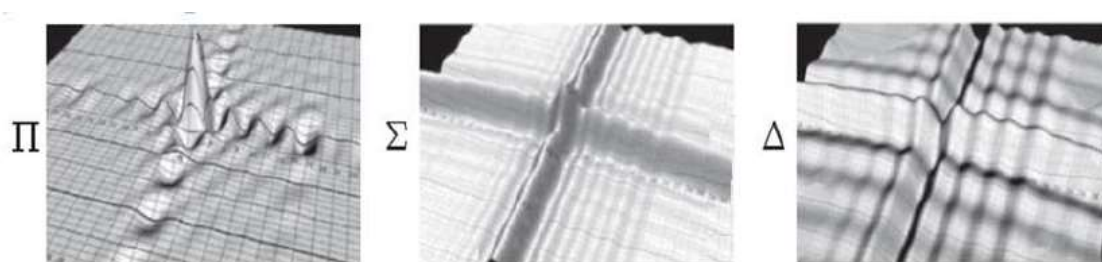


Рис. 2.2. Перемножена («олівцевий промінь»), сумарна («ніж») і різницева діаграми антен «Пн – Пд» і «Сх – Зх» у площині (u, v) (наведена на напрямок зеніту).

Форма діаграми спрямованості (ДС) показана на рис. 2.1. Джерела перетинають промені антени «Пн – Пд» (А, В, С, D, Е) протягом приблизно однієї години. Враховуючи, що вузький олівцевий промінь перетинається джерелом за 2 хвилини (в напрямку небесного екватора), чутливість до

періодичних джерел (для сумарної ДС) значно зростає. Хоча для транзйєнтних джерел накопичення є неможливим і результуюча чутливість рівна миттєвій, проте поле зору визначається поперечною сумарною діаграмою: $30' \times 15^\circ$ уздовж напрямку «Сх – Зх» і $30' \times 15^\circ$ – уздовж напрямку «Пн – Пд», що приблизно в 100 разів більше за «олівцевий» промінь ($30' \times 30'$).

Використання 5 променів прискорює огляд і дозволяє супроводжувати одне й те ж джерело під час проходження через різні промені. Сумарна ширина за координатою схилєння складає 2.5° . Щодня промені антєни переміщуються на 2.5° з Півдня на Північ і записується нова смуга неба.

Таким чином, за ~ 40 днів безперервних записів має бути покрита вся Північна небесна півсфера. З огляду на те, що необхідно мати кращі завадові умови та слабкіший вплив іоносфєри, 40 повних днів були перетворені на 80 ночей із 6-місячним інтервалом між двома спостережними сєсіями, по 40 ночей кожна. Найнижче схилєння (-10° , або приблизно 60° зєнітного кута для географічного положєння УТР-2), яке потрібно записати в Огляді, було обрано виходячи з умови втрати не більше половини ефективної площі антєни, порівняно з напрямком на зєніт, коли промінь наведений у це положєння (широта УТР-2 складає $49^\circ 38' 10''$ пн. ш.).

Щє один важливий параметр Огляду – це часова роздільна здатність. Недоліком саме декаметрового огляду є великий час розсіяння імпульсу навіть для відносно близьких пульсарів, що не дозволяє досліджувати МСП. Однак ця обставина дозволяє істотно скоротити кількість спостережних даних за рахунок використання великого часового накопичення під час спостережень і прискорити розрахунки, оскільки можна застосувати просту постдетекторну компенсацію дисперсії (замість додетекторної або когерентної [85]). Часова роздільна здатність Огляду (8 мс) обрана таким чином, що лише декілька відомих пульсарів мають на декаметрових хвилях менший час розсіяння. Слідуючи далі цій логіці, періоди шуканих пульсарів будуть рівними або більшими за декілька відліків обраної часової роздільної

здатності. Таким чином, періоди пульсарів обмежуються знизу значеннями $50 \div 100$ мс. Крім того, через існування дисперсії навіть короткі імпульси (тривалістю менше обраного значення часової роздільної здатності) будуть займати у даних дві та більше точки часової послідовності.

Стала часу розсіювання для джерел із $DM > 30 \div 50$ пк/см³ зазвичай стає порядку 1 с, тому сигнали джерел повторюваного випромінювання (таких, як пульсари) розмиваються (розмазуються) і стають неперіодичними. Через це область у просторі, що досліджується, обмежена відстанню 1–2 кпк від Землі (залежно від напрямку в Галактиці), що відповідає $DM = 0 \div 30$ пк/см³ (це пов'язано із дуже сильним впливом ефектів поширення на низьких частотах) [48].

Частотний діапазон Огляду – $16.5 \div 33.0$ МГц, це верхня половина робочого діапазону УТР-2. Він поділений на 4096 дискретних частотних каналів, тобто роздільна здатність складає близько 4 кГц. Даний діапазон був обраний завдяки кращим заводовим умовам (особливо у вечірні та ранкові години) та враховуючи факт, що більшість пульсарів випромінюють слабо в нижній частині частотної смуги УТР-2.

Істотною відмінністю даного огляду є тривале накопичення сигналів для всіх напрямків наведення радіотелескопу, незалежно від галактичних координат, що здійснюється за допомогою спільної обробки даних усіх променів радіотелескопу в часовому інтервалі ~ 1 год зі значним перекриттям за часом. Це дозволяє отримати однакову чутливість для області найближчого галактичного оточення, радіусом від частин до одиниць кілопарсек, де джерела розташовуються практично рівномірно. Спочатку досліджуються сигнали з $DM < 30$ пк/см³ із кроком 0.01 пк/см³. У майбутньому діапазон досліджуваних DM буде розширений.

Стратегія проведення та параметри декаметрового огляду Північного неба з метою пошуку пульсарів і транзієнтів описані в [86]. Автори також розповідають про характеристики обладнання, алгоритми обробки даних і про попередні результати даного дослідження (на момент публікації).

Найпершим результатом Огляду, що наочно показав його здатність виявляти шукані джерела, було перше виявлення на декаметрових хвилях нещодавно відкритого близького пульсара J0240+62 (пояснення надано нижче). Тестові вимірювання, проведені на УТР-2, показали, що його чутливість для транзієнтних сигналів складає 5 Ян, а для періодичного випромінювання пульсарів – декілька мЯн.

Чутливість Огляду різна для різних частин неба. Вона залежить, по-перше, від зенітного кута джерела (і як наслідок – від ефективної площі телескопа) і по-друге – від Галактичного фону в обраному напрямку. На рис. 2.3 показані верхні ліміти 4σ , що відповідають недетектованим пульсарам як функція часового кута (верхня панель) та схилення (права панель). Положення пульсарів нанесені на карту Північного неба на 20 МГц [87]. Пік на верхній панелі відповідає приблизно напрямку на центр Галактики. Межі детектування нормовані на рівень 4σ для PSR B0809+74 (пустий квадрат і пунктирна лінія). Область, близька до центру Галактики ($RA = 17^h 45^m$), чітко виділяється. Тут чутливість одночасно зменшується через високу температуру галактичного фону та низьку δ джерел. У напрямку Антицентру, вплив інтенсивного галактичного шуму частково компенсується малими зенітними кутами пульсарів у тій області, що спостерігається на УТР-2. На рис. 2.3 також наведено співвідношення A_e/A_{emax} . Кількість недетектованих пульсарів не залежить строго від зенітного кута. Ліва нижня панель показує порівняння координат продетектованих (хрести) та недетектованих пульсарів (ромби з нормованими значеннями верхньої межі детектування, що також зображено на верхній панелі). Значення на рис. 2.3 були нормовані на рівень 4σ для PSR B0809+74 (пунктирна лінія). Рис. 1.10 показує, що чутливість, досягнута за допомогою спостережень, для майже всіх недетектованих пульсарів нижча, ніж для PSR B0809+74 в 1.4–1.5 разу. Підвищення чутливості можна досягти за рахунок збільшення часу накопичення (із нинішніх 90 хв до 6–8 год), що дозволить зменшити поріг детектування джерел імпульсного випромінювання у 1.5–2.5 рази. В цьому

випадку чутливість для більш, ніж 25 пульсарів даної вибірки була б кращою, ніж чутливість, досягнута для PSR B0809+74 за 90 хв накопичення.

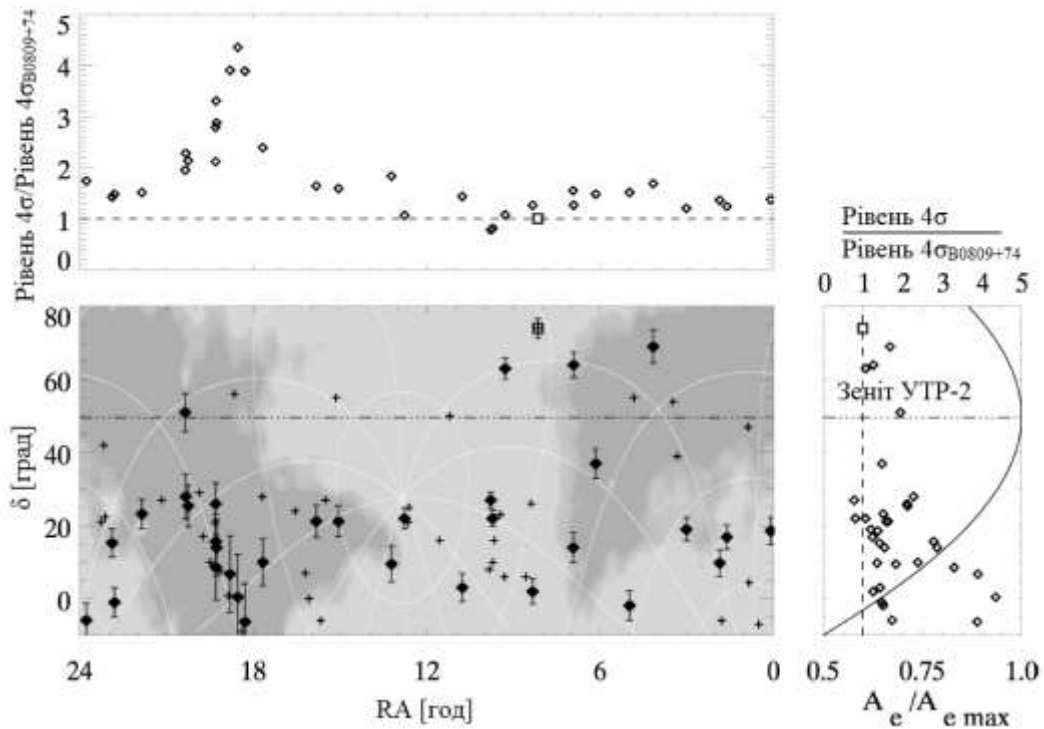


Рис. 2.3. Верхня межа щільності потоку непродетектованих пульсарів (відношення тривалості імпульсу до періоду 0.1, $\Delta\nu = 4$ МГц) як функція часового кута (верхня панель) і схилення (права панель). На нижній лівій панелі показані, для порівняння, координати продетектованих (хрестики) і непродетектованих пульсарів (ромби) [60].

Для того, щоб мінімізувати вплив завад, спостереження проводилися в нічний час (зазвичай із 18:00 до 7:00 місцевого часу для того, щоб забезпечити перекриття двох 12-годинних інтервалів за прямим піднесенням – RA). Спостереження в дні, близькі до весняного й осіннього рівнодень, дозволили приблизно вирівняти вплив завад між обома 12-годинними інтервалами. Варто зазначити, що при цьому спостереження найчастіше починалися та закінчувалися при значеннях прямого піднесення близько 6:00 і 18:00. Ступінь покритості небесної сфери спостереженнями Огляду показаний на рис. 2.4.

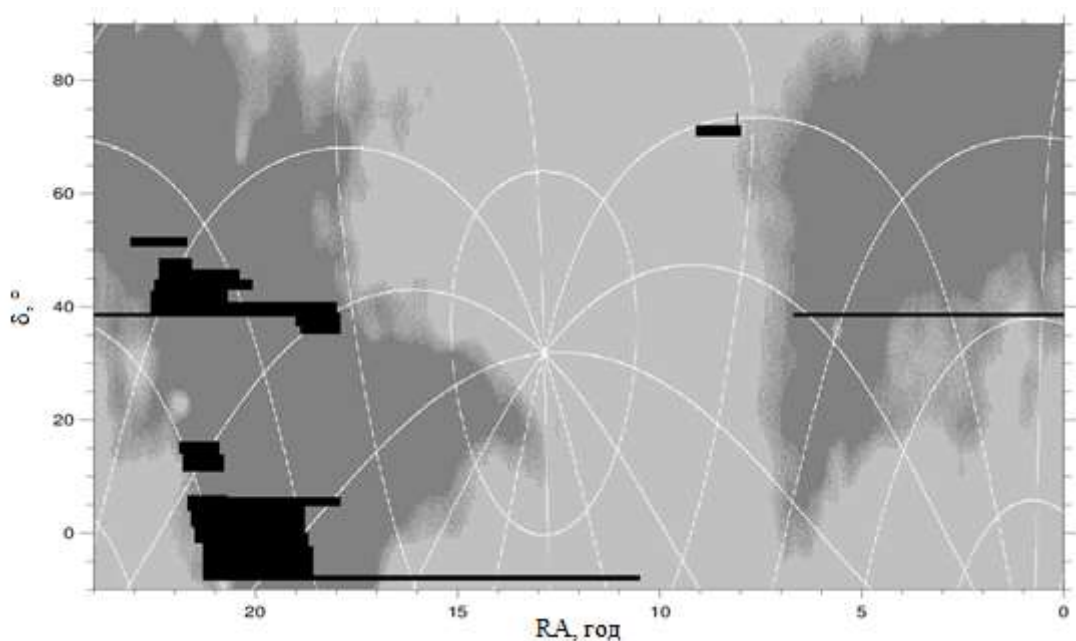


Рис. 2.4. Карта неба з позначеними (чорним кольором) областями, які не покриті Оглядом.

Пізніше, при обробці, під час візуальної перевірки даних, увагу привернули послідовності повторюваних подій на низькому значенні $DM = 3.83 \text{ пк/см}^3$ [88]. Ці події були продетектовані в коді Огляду, що відповідає $\delta = 63.1355^\circ$ у записах усіх п'яти променів телескопа (рис. 2.5).

Завада теж може з'явитися водночас у всіх п'яти променях, але вищезгадане джерело було продетектоване в різних променях і в різний час. Вперше його ознаки з'явилися в центральному промені та зберігалися там близько години (що відповідає схемі антенної діаграми «Пн – Пд»). В середині проходження джерела через центральний промінь, протягом 4 хв події детектувалися в усіх п'яти променях одночасно. Це означає, що об'єкт був у своїй верхній кульмінації та перетинав діаграму антени «Сх – Зх», яка перекриває всі 5 променів антени «Пн – Пд» (рис. 2.1). Після того, як джерело завершило проходження через центральний промінь (С), воно опустилося зі своєї верхньої кульмінації та послідовно перетнуло два нижчі промені (D і E). Кожна подія мала співвідношення С/Ш не менше 8. Знаючи час кульмінації, було визначено пряме піднесення джерела (RA), яке

виявилося рівним 2 год 41 хв. Схилення чітко визначається кодом огляду та смугою, в якій воно було знайдене (центральный промінь), тобто близько $+63^\circ$. Таким чином, знаючи приблизні координати та міру дисперсії, ідентифікувати це джерело було легко, використовуючи каталог пульсарів ATNF [61]. Це був пульсар PSR J0243+6257, нещодавно відкритий на GBT [89]. Він ніколи не детектувався на декаметрових хвилях взагалі та на УТР-2 – зокрема. Його міра дисперсії не була точно виміряна (будучи вказаною в [89] на рівні 4 пк/см^3), тому була уточнена в Огляді. На рис. 2.6 показаний сумарний графік залежності С/Ш від DM для даних променю С, що містить чистий пік на $DM = 3.83 \text{ пк/см}^3$.

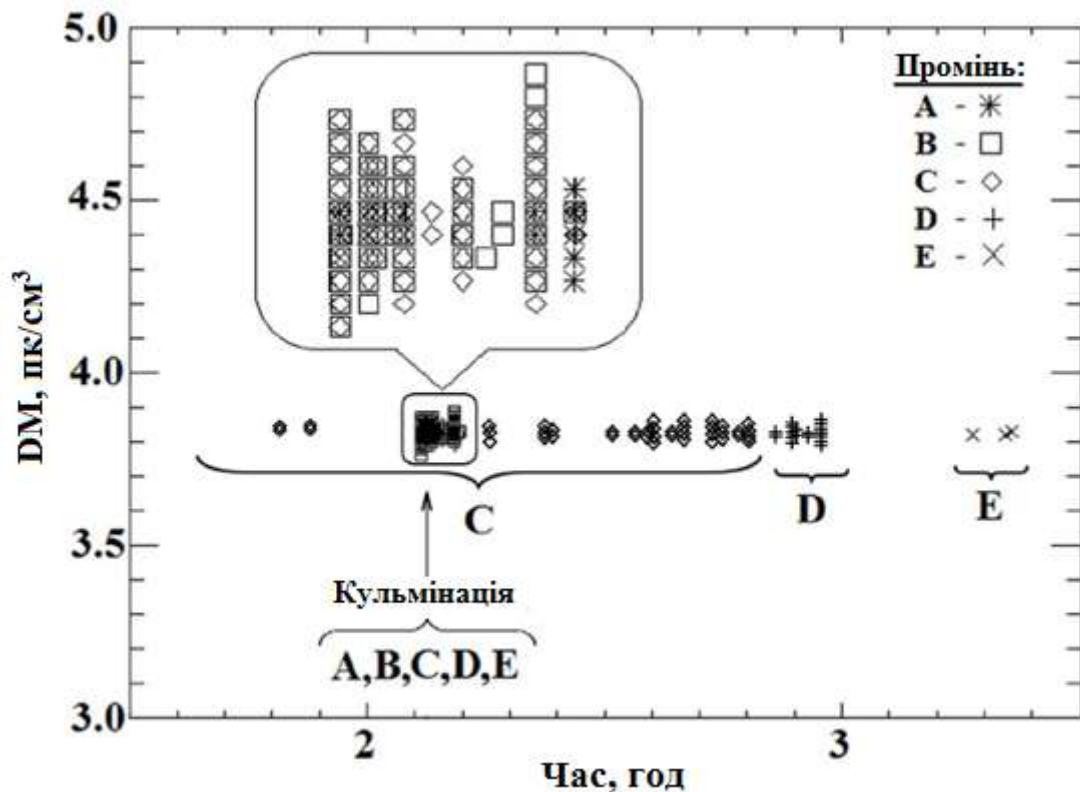


Рис. 2.5. Випромінювання PSRJ0243+6257 у всіх п'яти променях УТР-2 [88].

Детектування пульсара PSR J0243+6257 було здійснено під час проведення Огляду (тобто при «сліпому» пошуку сигналів) на радіотелескопі УТР-2. Крім того, при подальшій обробці було редетектовано індивідуальні імпульси ще більше 10 відомих пульсарів. Таким чином, була показана

спроможність УТР-2 виявляти шукані сигнали саме в такому режимі. Це означає, що параметри даного дослідження були обрані правильно й детектування як нових, так і відомих джерел періодичного та спорадичного радіовипромінювання на УТР-2 є цілком можливим і більш, ніж ймовірним.

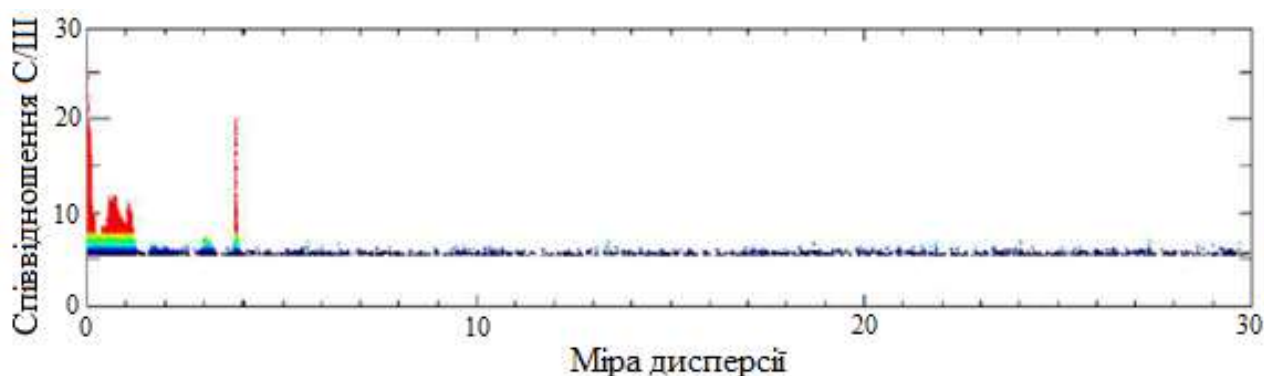


Рис. 2.6. Детектування PSR J0243+6257. Точне значення міри дисперсії – 3.83 пк/см^3 .

2.1.3. УТР-2

УТР-2 (Український Т-подібний Радіотелескоп другої модифікації) – це велика електронно-контрольована фазована решітка [10]. Він був уведений до експлуатації в 1970 році та з 1972 року регулярно використовується для численних астрофізичних дослідницьких програм. Основні області досліджень включають Сонячну систему (спорадичне радіовипромінювання Сонця, сонячна корона, міжпланетні мерехтіння, юпітеріанське декаметрове випромінювання на різних часових шкалах, часова структура блискавок на Сатурні і т. д.), Галактику (пульсари, транзієнти, лінії поглинання в хмарах міжзоряного газу, нетеплове фонове випромінювання Галактики, спалахуючі зорі і т. д.), позагалактичні джерела (каталог джерел декаметрового діапазону Північного неба включає більше 2300 позагалактичних об'єктів).

Його величезна ефективна площа, багатопроменева (5) антенна діаграма, широке керування променем ($\sim 2 \times 10^6$ різних напрямків наведення) дозволяють здійснювати супровід радіоджерел у великому інтервалі кутів, а широкий частотний діапазон, наряду з цифровими приймачами з високою

часовою та частотною роздільною здатністю, роблять УТР-2 потужним інструментом для декаметрової радіоастрономії [90].

Основні характеристики УТР-2 такі: ефективна площа – 150000 м^2 на 16 МГц [84, 10]; безперервний частотний діапазон – $8\text{--}33 \text{ МГц}$; ширина променя на половині потужності (на 25 МГц): $24' \times 12^\circ$ (Пн – Пд) та $15^\circ \times 24'$ (Сх – Зх) і $24'$ – за обома координатами в режимі повного телескопу; промінь може наводитися в межах 180° у напрямку Пн – Пд і 120° – у напрямку Сх – Зх; багатопроменевість – до 5 одночасних променів, розділених на $23'$ (на 25 МГц) у напрямку Пн – Пд.

Завдяки своїй великій ефективній площі, УТР-2 досі є найбільш чутливим радіотелескопом декаметрового діапазону. Порівняно з Хрестовидним Телескопом Міллса, Т-подібна форма УТР-2 забезпечує ту саму роздільну здатність, але є більш економічною в сенсі конструкції. Симетрична частина антени була розміщена в напрямку меридіану (Пн – Пд), тому що для радіоастрономічних спостережень зазвичай більш корисним є отримання безперервного запису координати α (прямого піднесення), ніж δ (схилення), використовуючи обертання Землі. Тому УТР-2 має Т-подібну форму, що показана на рис. 2.7. Вона складається з двох перпендикулярних антенних решіток (масивів), більша з яких (Пн – Пд) витягнута уздовж меридіану та забезпечує роздільну здатність за схиленням (висота), а менша (Сх – Зх) – асиметрична відносно центру радіотелескопа, протягнута уздовж кола паралелі та забезпечує роздільну здатність за прямим піднесенням (азимут).

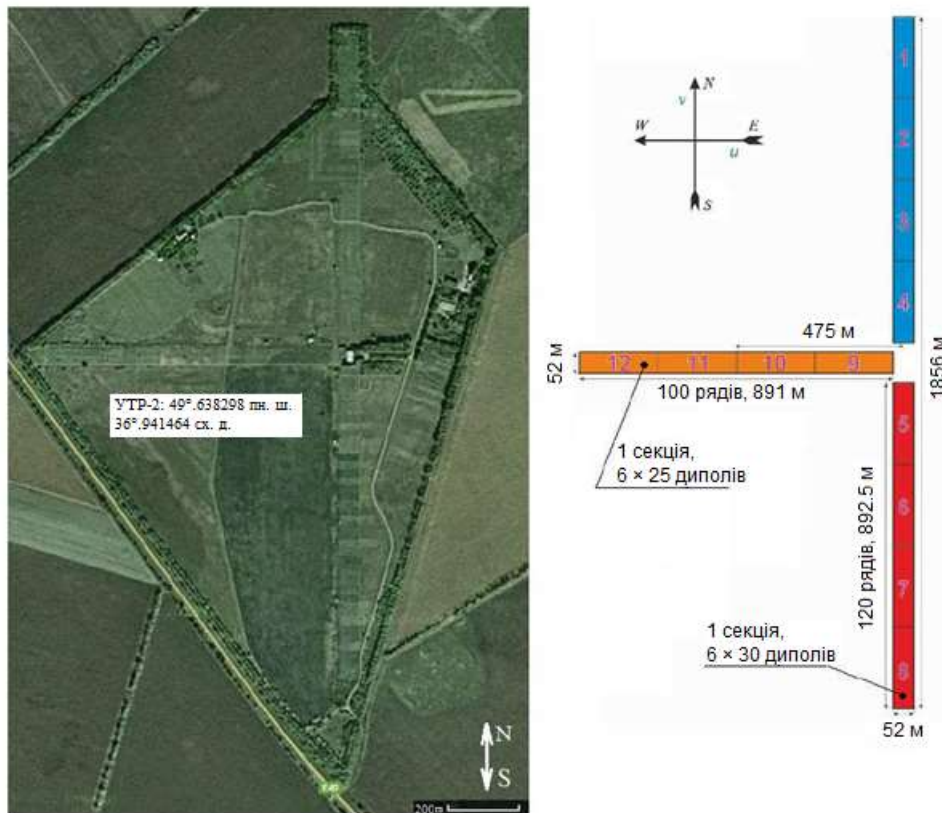


Рис. 2.7. Вид із супутника на УТР-2 (ліва панель), кількість секцій і розміри (права панель).

2.1.4. Приймачі

Завдяки швидкому розвитку цифрової техніки вдалося істотно вдосконалити реєструюче обладнання. Широкосмугові приймачі з обчисленням спектру в режимі реального часу та приймачі з оцифрованою записом повної смуги $0 \div 33$ МГц застосовувалися на УТР-2, починаючи з 1999 року. За цей час вони істотно модернізувалися й останній варіант [91], який має 16-бітний АЦП із частотою тактування вище 130 МГц, відповідає практично всім вимогам по широкосмуговості та завадостійкості в умовах завантаженого потужними завадами декаметрового діапазону.

Наразі на УТР-2 встановлені 5 таких приймачів – по одному на кожен промінь телескопу. Основні їх параметри такі: кількість вхідних каналів – 2; часова синхронізація – вхід 1/ секунду; кількість частотних каналів – 8192 (у роботі використовується 4096); частотна роздільна здатність – 4 кГц. Вони мають двоканальні входи з 16-бітними аналого-цифровими перетворювачами

(АЦП) і плати з матрицями з програмованою логікою (FPGA) для обчислення та накопичення миттєвих спектрів «он-лайн». Використання приймачів, які тактуються зовнішніми стандартами частоти та часу, дозволило проводити тривалі спостереження кількома променями радіотелескопу без втрати синхронізації. Зовнішня синхронізація забезпечується рубідієвим стандартом частоти з відносною частотною нестабільністю порядку $\sim 5 \times 10^{-12}$. Довготермінова синхронізація здійснюється за допомогою GPS-приймача, який генерує сигнал «імпульс за секунду» (Pulse Per Second – PPS), що прив'язаний до часу UT (Universal Time). Всі приймачі з'єднані в єдину мережу та можуть контролюватися дистанційно за допомогою надсилання виконавчих команд до відповідного порту Ethernet, використовуючи протокол TCP/IP.

Приймачі можуть записувати дані в трьох режимах: 1) «waveform», 2) «spectra», 3) «correlation». У режимі «waveform» потік даних від виходу АЦП записується напряму на жорсткий диск, без будь-якої обробки. Швидкість передачі даних складає ~ 264 Мб/с. Це означає, що максимальна швидкість передачі вихідних даних телескопу ~ 1 Гб/с (5 приймачів).

У другому записуючому режимі («spectra») вхідний сигнал перетворюється на 2-вимірну (час, частота) спектрограму. Кожен шматочок у спектрограмі (індивідуальний спектр) отриманий за допомогою швидкого перетворення Фур'є (FFT) від часових послідовностей із 16384 відліків із наступним усередненням, обраним спостерігачем. Інформація про фазу в цьому режимі втрачається. Типова швидкість передачі даних при часовій роздільній здатності 100 мс – ~ 327 кб/с. Останній режим запису («correlation») забезпечує запис спектру потужності двох каналів, уздовж дійсної та уявної частин їхньої комплексної крос-кореляції. Швидкість передачі даних у цьому режимі вдвічі більша, ніж у режимі «spectra».

Спостережні дані записуються у вигляді файлів формату .jds. Формат даних (*.jds) містить шапку з інформацією, такою як час спостережень, часова роздільна здатність, частота дискретизації, частотний діапазон, спосіб

синхронізації, режим запису (waveform, spectra, correlation) і т. д. Ці параметри використовуються при подальшій обробці даних. Спостерігач може обрати опцію: створювати файли даних заданого розміру чи довжини, замість того, щоб записувати всі спостережні дані в один вихідний файл. Розмір кожного файлу обирається перед записом (під час спостережень Огляду створювалися файли по 2048 Мб кожен). Зазвичай, створення файлу не синхронізується з наведенням телескопу (коли йде супровід джерела). Кожен створений файл містить стандартну шапку JDS і лічильники, що містять інформацію про даний запис (табл. 2.1). Наприклад, якщо приймач записує спектри, лічильники розміщуються у двох найвищих частотних точках кожного спектру.

Таблиця 2.1. Параметри з шапки файлу JDS, записаного в Огляді

Параметр	Значення	Приклад (зі спостережень Огляду)
filename:	Назва файлу	E060513_214623.jds
LT	Місцевий час і дата	Tue May 07 00:46:23 2013
GMT	Час і дата UT	2013-05-06_21:46:23
sys_name	Назва приймача	E
YYYY/MM/DD, HMS	Рік/Місяць/Дата, год/хв/с	2013 5 6 21 46 23
place	Місце проведення спостереження	UTR-2, Kharkov, Ukraine
Desc	Дескриптор, опис сесії спостережень (код наведення, к-ть променів)	Survey_V0_5beams
Clock freq	Якщо існує зовнішня синхронізація, то округлення відбувається до 10 кГц	66000000.
GPS Synchr	Чи є прив'язка до часу GPS (0 – ні, 1 – так)	1
Mode	Режим запису (0 - waveform, 1 – спектр, 2 – кореляція)	1
Wavfrm Ch	Канали при записі в режимі «wayform» (0 – A, 1 – B, 2 – A і B)	0

Продовження таблиці 2.1

Band	Частотна смуга (0 – повна, 1 – нижня частина, 2 – верхня частина, 3 – налаштовувана)	2
Nch min	Номер нижнього частотного каналу	4096
Nch max	Номер верхнього частотного каналу	8191
Nch / sp	Кількість спектрів у смузі	4096
avrs	Кількість спектрів в одному динамічному відліку	64
Weight Win	Тип зовнішнього вікна (0 – внутрішнє вікно і Hanning, 1 – файл вікна береться ззовні)	0
Ext Synchr	Чи увімкнена зовнішня синхронізація (0 – внутрішня, 1 – зовнішня синхронізація)	1
N spectra in file	Кількість точок у файлі	65536.000
dt (msec)	Часова роздільна здатність, мс	7.9437576
df (kHz)	Частотна роздільна здатність, кГц	4.0283203
file duration (sec)	Тривалість одного файлу, с	520.60210

Для задачі огляду всього неба важливі всі описані вище характеристики радіотелескопа і приймаючого обладнання.

2.2. Обробка спостережних даних

Як було показано в Розділі 1, у даний час відомо багато видів нейтронних зір. Звичайні пульсари випромінюють короткі імпульси кожного обертового періоду, пульсари з нуллінгом випромінюють не кожного періоду, інтермітентні пульсари (пульсари «на півставки») можуть інколи «вимикатися» та припиняти випромінювати на тисячі періодів, радіотранзйєнти, що обертаються, випромінюють один імпульс на сотні періодів. Але зазвичай властивість періодичності значно полегшує виявлення нейтронних зір у їх різних втіленнях, особливо в звичайних пульсарах. Для останніх, завдяки можливості накопичення періодів, чутливість зростає як

$\sqrt{N_p}$ спостережених періодів пульсара. Оскільки періоди короткі (від мілісекунд до секунд), то в 1 годині спостережень можна накопичити кілька тисяч індивідуальних імпульсів. На практиці, для цього накопичення потрібно з високою точністю знати період пульсара та мати високу часову роздільну здатність даних для того, щоб розділити період із достатньою кількістю точок даних і уникнути накладення спектрів.

На декаметрових хвилях не видно індивідуальних імпульсів переважної більшості пульсарів, за винятком найближчих і тих, що випромінюють так звані «аномально інтенсивні імпульси» [31] та гігантські імпульси. Але їх все ще можна детектувати, тому що слабке випромінювання присутнє на тих самих довготах у кожному періоді та проявляється після накопичення. Випромінювання транзієнтів, ймовірно, складається з індивідуальних імпульсів (або імпульсів, що повторюються спорадично), які можуть мати різну інтенсивність. Лише частотне інтегрування сприяє детектуванню таких подій.

Як імпульси пульсарів, так і транзієнтні сигнали є сильно диспергованими, що стає найбільш очевидним у декаметровому діапазоні. Дисперсійна затримка має бути компенсована перед спектральним інтегруванням даних. Імпульси зігнуті на площині «Час – Частота», що робить їх відмінними від земних завад, які зазвичай є або вертикальними (широкосмуговими) шипами, або горизонтальними (вузькосмуговими) сигналами (рис. 2.8). Таким чином, дисперсія є ще одним фактором, що сприяє виявленню пульсарів і транзієнтів саме в низькочастотному діапазоні.

Незважаючи на вищезгадані корисні властивості випромінювання пульсарів, завади є суттєвим перешкоджаючим фактором, що зменшує динамічний діапазон, вводить помилкові періодичності та спотворює розподіл даних. На першій стадії обробки необхідно видалити якомога більше слідів завад, у той же час не видаливши дисперговані імпульси пульсарів і транзієнтів.

Після отримання спостережних даних, проводиться їх конвеєрна обробка, яка включає декілька етапів. Спочатку всі дані очищуються від завад за допомогою автоматичних алгоритмів. Далі усувається вплив дисперсійної затримки у МЗС і здійснюється пошук сигналів, які перевищують встановлене порогове значення інтенсивності [86, 88, 92,].

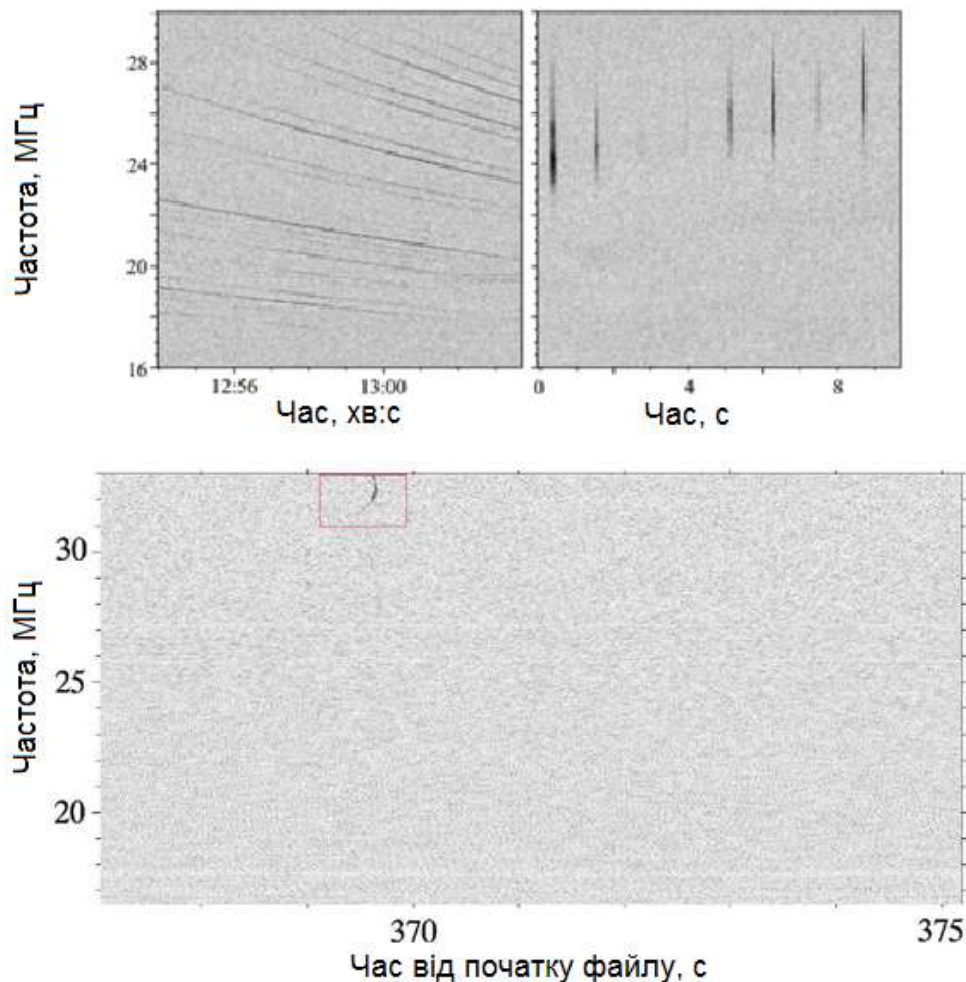


Рис. 2.8. Імпульси пульсара до усунення (верхня ліва панель) та після усунення впливу дисперсійної затримки (верхня права панель). На нижній панелі наведений сигнал земного походження, який після аналогічної процедури виглядає відмінно від імпульсу космічного джерела (частотне запізнення якого підкоряється закону $\sim f^{-2}$).

2.2.1. Характеристики земного випромінювання, яке імітує космічні сигнали (земні радіочастотні завади)

Оскільки Огляд проводиться на радіотелескопі УТР-2 (який працює на екстремально низьких частотах і розташований неподалік крупного

обласного центру – Харкова), то гостро постає проблема радіочастотних завад. При виконанні даної роботи необхідно максимально усувати їх сліди зі спостережних даних, а також надійно відрізняти від сигналів космічної природи. Радіочастотні завади генеруються, здебільшого, такими джерелами, як ефірні радіостанції, іоносферні зонди, іскри запалювання транспортних засобів, радіоприймачі та радары. При наявності декількох високоінтенсивних завадових сигналів, частотний діапазон буває забрудненим майже повністю (а інколи – й повністю). Вночі (порівняно з денними годинами) кількість завад різко падає, тому саме в цей час проводяться спостереження в межах Огляду.

Необхідно бути максимально обачними при пошуку космічних сигналів у спостережних даних, особливо враховуючи результати роботи [93], в якій розглядаються так звані «перитонні» сигнали. «Перитони» – це транзієнти земної природи, тривалістю в мілісекунди, чиє частотно-залежне запізнення випромінювання імітує дисперсію астрофізичного імпульсу, який поширюється крізь розріджену, холодну плазму (рис. 2.9).

Фактично, їх схожість на FRB 010724 раніше кинула тінь на тлумачення походження швидких радіоспалахів, які в іншому випадку виявляються позагалактичними. До даної роботи фізична природа перитонів, що імітують закон дисперсії космічних джерел, залишалася незрозумілою. Автори ідентифікували потужне позасмугове випромінювання на 2.3–2.5 ГГц, яке пов'язане з кількома перитонними подіями. Подальші тести показали, що перитон може бути згенерований на частоті 1.4 ГГц, коли дверцята мікрохвильової печі передчасно відкриваються й телескоп знаходиться на відповідному відносному куті. Радіовипромінювання, що виходить із мікрохвильових печей під час фази відключення магнетрону, точно пояснює всі спостережувані властивості перитонних сигналів. Після ідентифікації джерела цих сигналів автори показують, що мікрохвилі на місці не могли викликати FRB 010724 (див. рис. 2.10). Видно, що розподіл FRB однорідний протягом дня, в той час як розподіл перитонних сигналів має

чітко виражений пік у робочі години (особливо в районі обіду). Випадковий розподіл виглядав би приблизно рівномірно, із легким падінням під час робочих годин, у які інколи здійснювалося технічне обслуговування телескопу. Бімодальний розподіл перитонів із піками на 200 і 400 пк/см³ є очевидним. Ця та інші спостережні відмінності показують, що FRB є чудовими кандидатами у справжні позагалактичні транзієнти, а не сигналами земного походження.

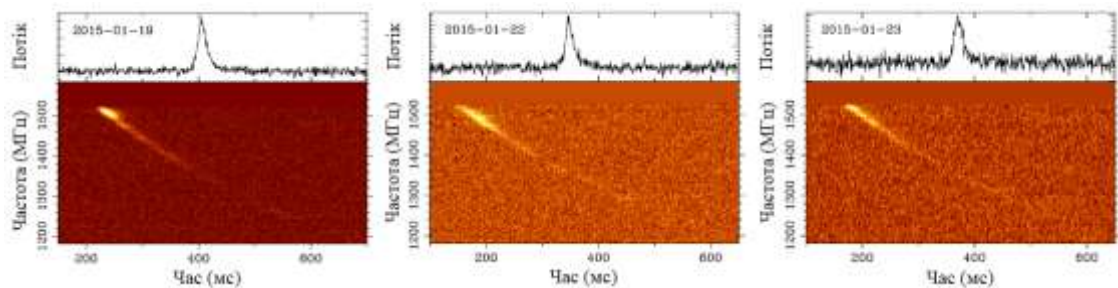


Рис. 2.9. Часово-частотна структура трьох січневих перитонів. У випадку подій, датованих 2015-01-19 і 2015-01-23, показані сумарні дані 13 променів. Для 2015-01-22 зображені лише дані променю 01, оскільки дані зовнішніх променів не були записані на диск [93].

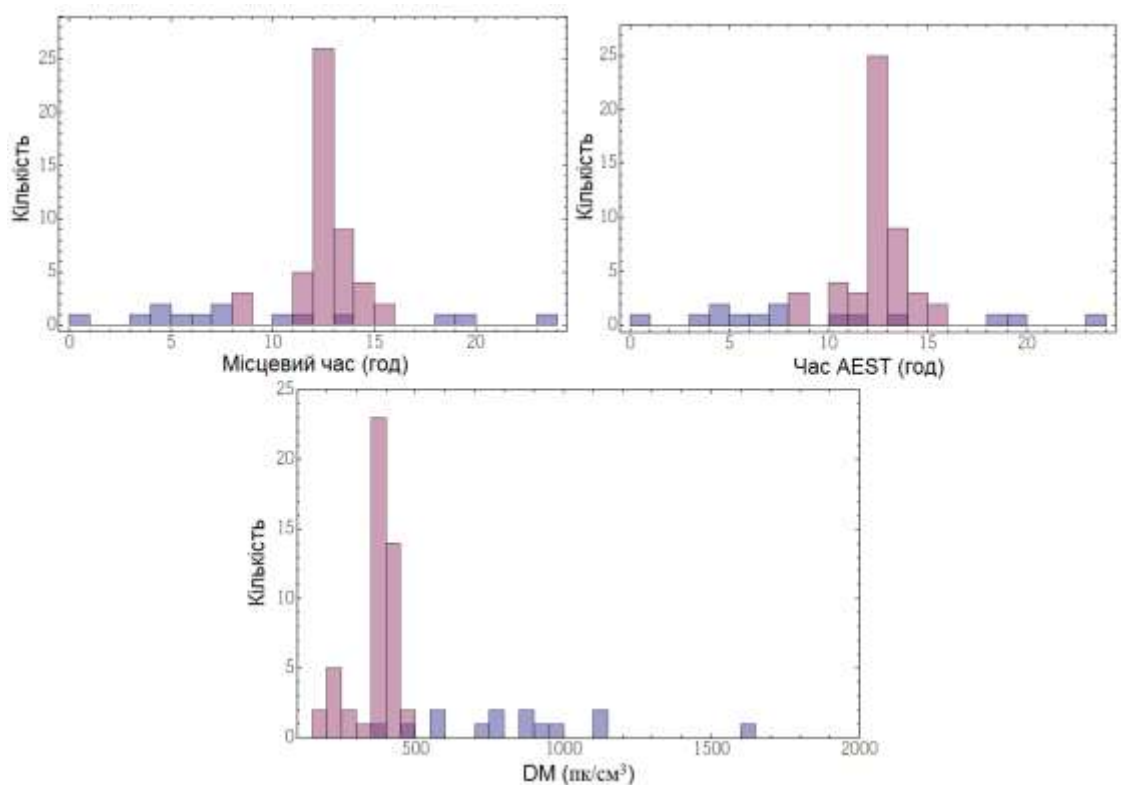


Рис. 2.10. Розподіли FRB (сині) і перитонів (червоні) як функція місцевого часу (вгорі зліва), як часу AEST (згори справа) і як функція DM уздовж всього діапазону пошуку (внизу) [93].

Іншим прикладом детектування імпульсів сумнівної природи є сигнали з роботи [94]. Ці два радіоспалахи були продетектовані з напрямку радіотихого гамма-пульсара Гемінга на частоті 34 МГц. Проте вузька частотна смуга, що використовується на радіотелескопі GEETEE, не дозволяє не лише точно виміряти значення міри дисперсії, але й хоча б визначити закон частотно-часової залежності: тобто вона пропорційна $1/f^2$ (як має бути у космічних сигналів) чи $1/f$ (що характерно для земних завад) (рис. 2.11).

Для усунення впливу радіочастотних завад у дисертаційній роботі використовується кілька методів. По-перше, були розроблені спеціальні налаштовувані програми, які здатні розпізнавати й усувати сліди RFI із «сирих» даних. По-друге, час спостережень обраний таким чином, щоб кількість завад була мінімальною. Найменше їх вночі, тому спостереження в межах даного огляду, як було зазначено, проводилися саме в нічний час.

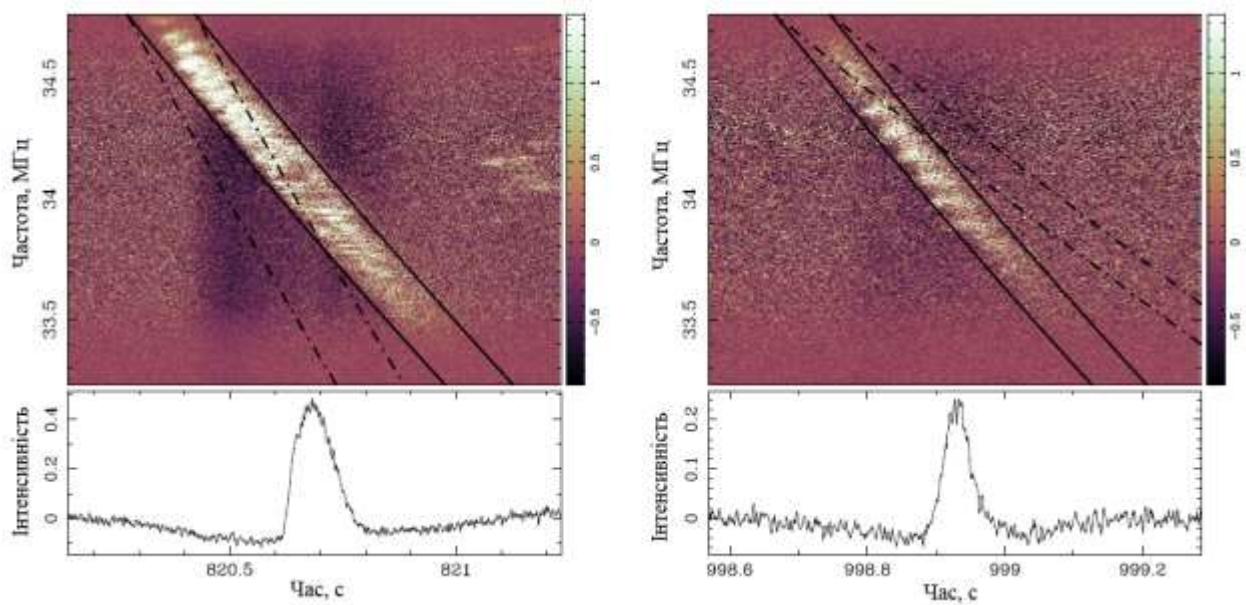


Рис. 2.11. Два яскраві радіоспалахи, що були відкриті на GEETEE в частотній смузі 33–35 МГц. Суцільними лініями позначені межі імпульсів, якщо б їх часово-частотна затримка була квадратичною, штрих-пунктирними – форми імпульсів, якщо б вони мали оціночні міри дисперсії 2.16 пк/см^3 і 1.42 пк/см^3 [94].

2.2.2. Усунення радіочастотних завад

Очистка від радіочастотних завад – це ключовий крок в обробці радіоастрономічних даних. Інколи радіоастрономічний сигнал є досить потужним, як сонячні спалахи або спорадичне радіовипромінювання Юпітера, але значно частіше він дуже слабкий і є значно нижчим за фон Галактики. В даному дослідженні метою є продетектувати слабкі сигнали віддалених космічних джерел на фоні потужних земних (штучних і природних) завад. Ситуація погіршується при зниженні частоти спостережень. Завади в декаметровому діапазоні є численними й інтенсивними (інколи перевищують рівень фону на 70-90 дБ, при ширині каналу в 4 кГц). Єдиним способом зменшити їх вплив, є використання високого динамічного діапазону приладів на всьому шляху слідування сигналу (через телескоп) і використання складних алгоритмів для очищення від завад.

УТР-2 розташований досить близько від населених пунктів і приблизно за 60 км від великого міста – від Харкова. Головними «генераторами» радіочастотних завад є ефірні радіостанції, транспорт (іскри запалювання), радари, іоносферні зонди, портативні радіоприймачі і т. д. Незважаючи на робочий діапазон телескопа 8–33 МГц, можна бачити вплив завад і з нижчих частот. Нелінійний елемент із найнижчим динамічним діапазоном (АЦП в даному випадку) продукує на виході комбінації гармонік вхідних сигналів.

На додачу до місцевих сигналів завад, телескоп приймає й ті, які були відбиті від іоносфери та землі. Гранична частота, нижче якої сигнал відбивається назад на землю, залежить від іонізації іоносфери, яка пов'язана з сонячною активністю. Протягом ночі рівень завад різко падає і в частотному діапазоні телескопа залишаються сигнали найближчих джерел.

У даних УТР-2 завади зазвичай лежать або уздовж осі частот (короткі, широкосмугові), або уздовж осі часу (вузькосмугові завади) на динамічному спектрі.

Очистка була побудована в три кроки: (1) калібрування та нормування даних, (2) детектування коротких «плям» у напрямку часу та частоти та (3) виявлення повністю забруднених частотних каналів і спектрів [88].

Перший етап поєднаний із оцінкою середнього та стандартного відхилення в кожному частотному каналі. В кожному каналі дані поділені на середнє значення по каналу і зроблене нульовим середнім (за допомогою віднімання одиниці).

Для виявлення «плям» завад – місць у спектрі, які займають досить широке поле за часом і частотою – використовується метод SumThreshod, який описаний далі. Суть полягає у використанні ковзаючих вікон у часі та частоті з оцінкою сумарного перевищення інтенсивності сигналу всередині вікна по відношенню до середнього та стандартного відхилення в усьому файлі. Запобіжним заходом, що не дозволяє «вичистити» і сигнали пульсарів, є невикористання малого розміру вікна в тій самій шкалі, де знаходиться імпульс пульсара. Завдяки скінченній часовій і частотній роздільній

здатності (8 мс та 4 кГц відповідно), імпульс пульсара може бути розкладений на маленькі «кроки» – комбінації кількох точок (відліків) на шкалі часу або частоти. Характерний розмір цих кроків залежить від міри дисперсії. Після тестування SumThreshold із різними розмірами вікна на записах кількох пульсарів, емпірично був обраний такий набір найбільш підходящих розмірів вікна: {2, 8, 16, 128, 256} – для частотної осі та {1, 2, 4, 8, 64} – для часової. Історично SumThreshold почав використовуватися в даній роботі зі стандартними налаштуваннями та порогом одиночного пікселя $T_1 = 10$ і було вирішено лишити ті самі параметри для всіх даних Огляду.

Третій крок необхідний для того, щоб знайти «погані» частотні канали та спектри з пороговими значеннями вище за $(\mu \pm 4\sigma)$ (програма PATROL – буде описана далі). «Погані» значення, позначені за допомогою SumThreshold і PATROL, замінені на значення медіани, яка порахована за виключно «гарними» значеннями в кожному фрагменті даних.

Кожен 1024-спектровий фрагмент очищується за допомогою описаної послідовності кроків і відправляється до окремого вихідного файлу, що має таку ж саму шапку, що й початковий файл даних. Результуючий розмір файлів за 13 годин спостережень складає 90 Гб. Після цього, послідовні очищені файли об'єднуються для зручності проведення подальшої обробки – дедиспергування (усунення запізнення сигналу на низьких частотах порівняно з високими).

Відсоток «поганих» пікселів протягом цілої ночі спостережень зберігається в лог-файлі. Зазвичай для однієї ночі спостережень створюється маска для приблизно 5% даних. На робочій станції (процесор i5 і пам'ять 32 Гб), очистка від завад займає приблизно стільки ж часу, як і спостереження.

У роботі [95] перераховані 5 основних методів усунення завад: 1) встановлення порогу в часово-частотній області, 2) використання методів фільтрації, 3) використання референтних каналів, 4) просторова фільтрація та

5) виключення викидів у розподілі ймовірностей спектру потужностей. У даній роботі з метою усунення завад використовуються, здебільшого, методи з першої категорії, а решта методів – для довідки (або підтвердження детектування) на наступних стадіях обробки.

Далі будуть описані два інструменти для усунення завад, що були обрані за основу для пошукового конвеєру в Огляді:

- PATROL (спрощена версія [60])
- Sum(Var) Threshold метод (використаний у LOFAR AOFlagger) [96], [97]

Позначення забруднених частотних каналів і часових інтервалів

Перший метод, PATROL (Pulsars And Transients Overall Lookup, «всеохоплюючий (загальний) пошук пульсарів і транзієнтів»), спочатку був частиною програмного забезпечення для усунення завад, розробленого для даних із «перепису» відомих пульсарів на УТР-2 [60]. Він дуже швидкий і позначає цілі «погані» частотні канали та часові інтервали на динамічному спектрі. «Погані» частотні канали зазвичай містять сигнали станцій радіомовлення, особливо на частотах нижче 20 МГц і біля 27 МГц (як місцеві, так і відбиті від іоносфери Землі). Ці канали можуть характеризуватися або аномальним середнім значенням (як правило, високим) або аномальною дисперсією (дуже великою чи малою). Тому для ідентифікації «поганих» каналів PATROL потребує значення середнього (μ) та стандартного відхилення (σ) кожного каналу, порахованого для сирих даних. Якщо взяти їх після усереднення, то ці канали (які також містяться в середньому спектрі та поділені на нього) не будуть так виділятися. μ та σ пораховані ітеративно в кожному частотному каналі, виключаючи значення вищі за $3\sigma_{it}$ при кожній ітерації, доки більше не залишиться піків для виключення. Маючи значення μ і σ для кожного каналу та поділивши σ/μ , можна отримати залежність, яка наведена на рис. 2.12.

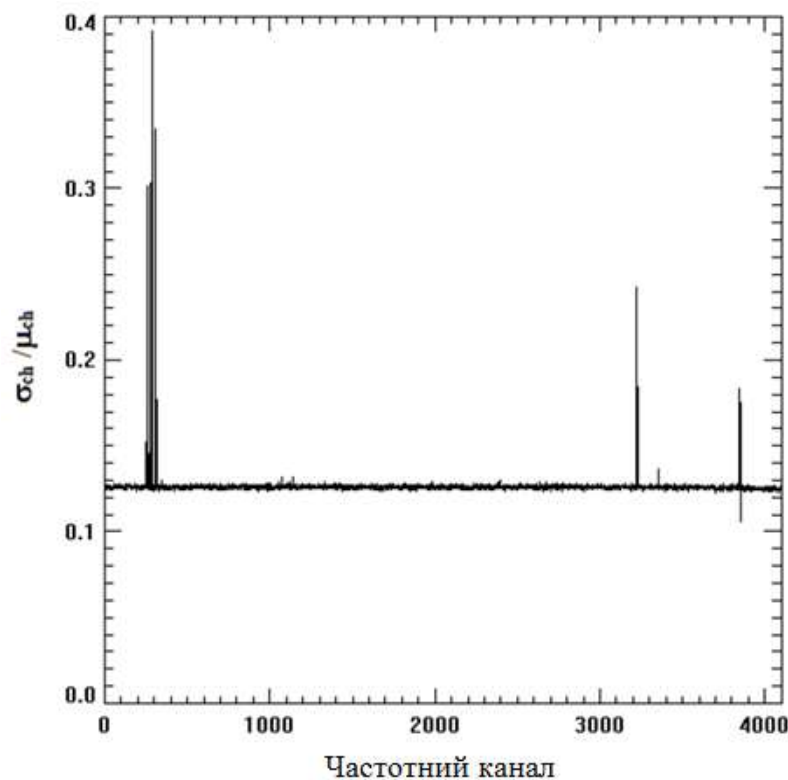


Рис. 2.12. Вхідний вектор для PATROL – стандартне відхилення в кожному частотному каналі, поділене на його середнє значення. Піками позначені частотні канали з дуже змінною інтенсивністю, провали – це канали високостабільної інтенсивності. Обидва типи каналів, найімовірніше, містять завади.

Тут максимумами є всі канали з високою змінністю та малим середнім значенням, а мінімумами – це канали з високоінтенсивними квазі-постійними сигналами. Таке представлення дозволяє знайти обидва типи «поганих» каналів, оскільки вони є викидами на цьому графіку. Всі інші канали мають приблизно те ж саме середнє значення, оскільки μ та σ корелюють ($\sigma = \mu / \sqrt{b\tau}$), де b і τ – це частотна та часова роздільна здатності, відповідно), і тому якщо значення в окремому каналі сильно (на > 4 стандартних відхилень) відрізняється від середнього, то вважається, що цей канал забруднений.

Ситуація з забрудненими часовими інтервалами значно простіша. Зазвичай є лише короткі, широкосмугові виступи, що продукуються

обладнанням телескопу, транспортом поблизу або природними джерелами, такими як блискавки. Вони значно перевищують середні флуктуації фонового шуму й навіть найслабші з них видимі для ока, хоча їх нелегко усунути. Якщо проінтегрувати динамічний спектр за частотою, створюючи інтегральні часові послідовності, то буде видно піки на місці кожного широкосмугового викиду. Кожен частотний канал містить частину цього викиду та дає вклад до результуючого піку, тому тоді ці піки виявляються значно вищими за середнє значення. Вони були знайдені, використовуючи поріг 2.7–3 стандартні відхилення вище середнього значення для часового ряду.

Іноді канал зачіпається частково, а потім передача зупиняється (як у випадку з рацією). Сигнал також може мати лінійну частотну модуляцію (як у випадку з іоносферними зондами), тому його частота збільшується чи зменшується з часом, що впливає на багато сусідніх частотних каналів протягом невеликих проміжків часу. Крім того, динамічний спектр може мати низькоінтенсивні плями або флуктуації інтенсивності через іоносферні ефекти. На жаль, описані типи завад або пропускаються модулем позначення завад PATROL (якщо вони слабкі), або позначаються уздовж цілих каналів і часових інтервалів, які їх містять (що також погано, оскільки втрачається багато точок корисних даних). На нижній панелі рис. 2.13 показаний калібрований 2-хвилинний «кадр» даних, що містить заваду та результат позначення завад за допомогою PATROL – «маску», яка є масивом зі значень 0 (забруднені пікселі) та 1 (чисті пікселі).

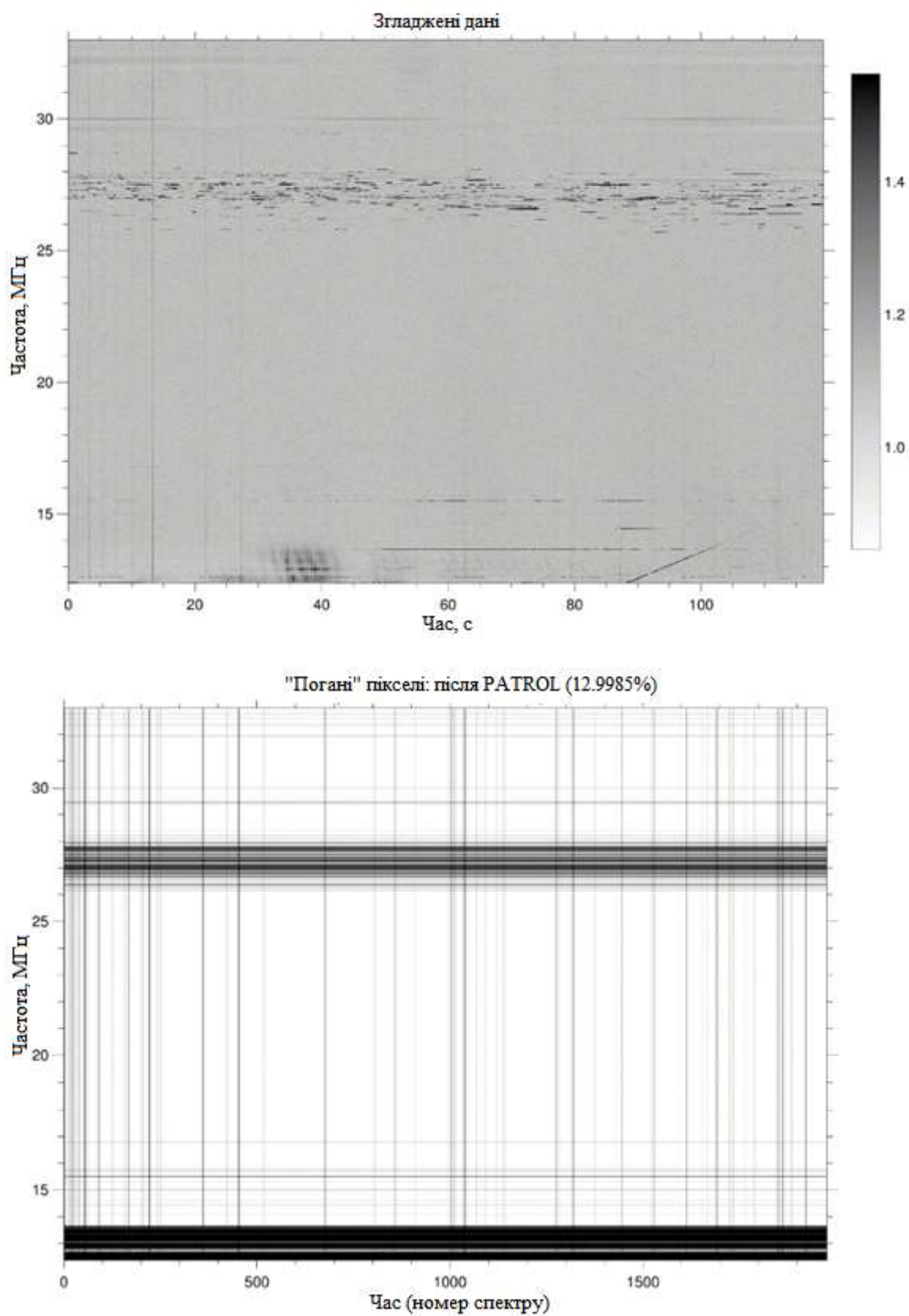


Рис. 2.13. Нормований (вирівняний) динамічний спектр (верхня панель) і результуюча маска «поганих» пікселів після позначення завад за допомогою PATROL (нижня панель). Були позначені близько 13% пікселів [88].

Позначення фрагментів у напрямку часу або частоти

Інший метод, що має назву SumThreshold [96], був створений А. Р. Оффрінга як стандартний конвеєр для видалення завад на LOFAR. Це дуже ефективний, але трудомісткий інструмент. Даний метод – багатоцільовий: трохи змінюючи параметри, його можна налаштувати на різні види радіочастотних завад. Зі стандартними налаштуваннями він працює досить добре на даних LOFAR і WSRT, із точністю розпізнавання 95% і ймовірністю помилкового позначення приблизно 0.1% [96]. Він детально описаний у [97], в розділі «The SumThreshold method», базується на методі CuSum ([98, 99]) і схожому методі VarThreshold [97], [96].

Головна ідея полягає в тому, що зазвичай завади формують з'єднані форми (структури) в напрямку або частоти, або часу. До даних застосовується набір порогів (окремо в напрямку частоти та часу) і знаходяться певні структури, що перевищують кожен поріг. Комбінація N відліків (або в напрямку часу, або в напрямку частоти) повністю позначається як така, що містить заваду, якщо всі її відліки (метод VarThreshold) або її середнє (метод SumThreshold) перевищують поріг T_N (що представлений в абсолютних величинах або пов'язаних зі стандартним відхиленням даних – σ). Розмір ковзаючого вікна N збільшується від ітерації до ітерації і чим більше N , тим нижчим є поріг T_N , застосований до відліків або їх середнього. У вихідному методі VarThreshold [96]

$$T_N = T_1 / (a \log_2 N), \quad (2.2)$$

де T_N – поріг для комбінації N пікселів, T_1 – поріг для одного пікселя (стандартне значення $T_1 = 10$) і $a = 1.5$ – емпіричний коефіцієнт. N , таким чином, є розміром ковзаючого вікна (взятий як степені 2: 1, 2, ..., 64). Програма-позначальник проходить кілька разів (кількість яких рівна кількості порогів і розмірам вікон) через кожен частотний канал (напрямок часу) і потім через моментальний спектр (напрямок частоти) на площині «Час – Частота», позначаючи все слабші завади. Потім маска «поганих»

пікселів горизонтальних проходів об'єднується (множиться) на маску «поганих» пікселів вертикальних проходів. Результат роботи цього позначаючого методу на тому самому фрагменті каліброваних даних, як на рис. 2.13, показаний на рис. 2.14.

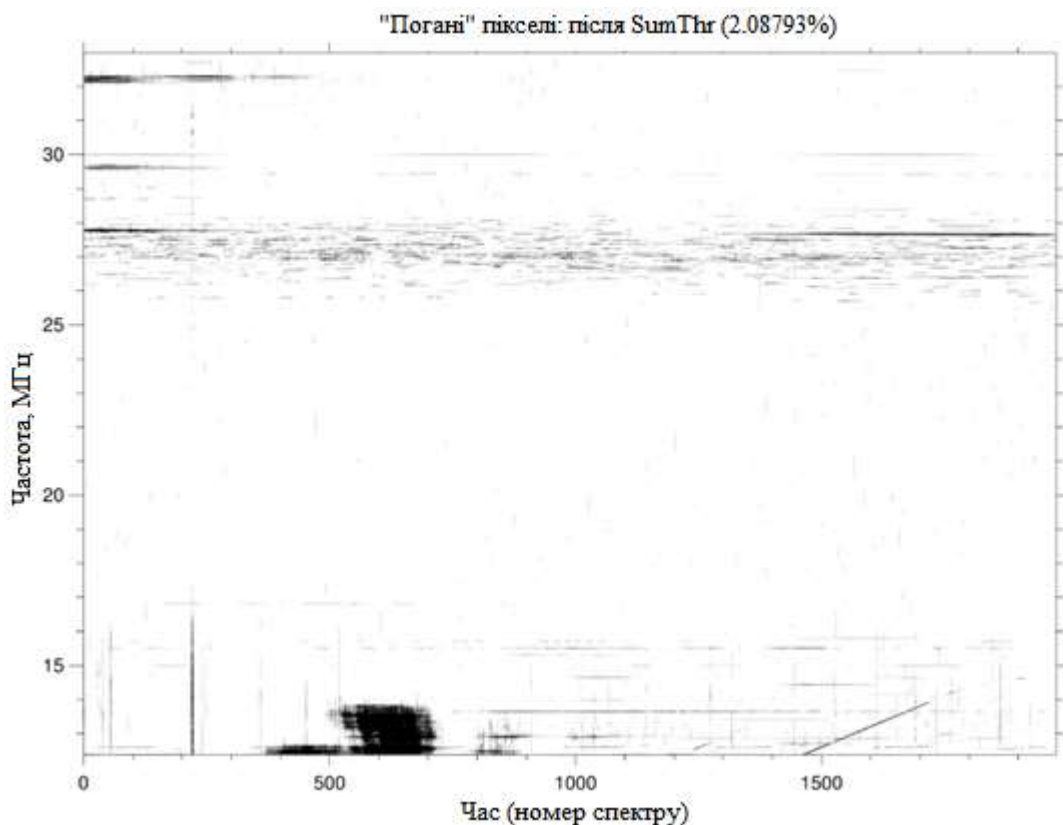


Рис. 2.14. Результуюча маска «поганих» пікселів після позначення завад за допомогою SumThreshold method: було позначено близько 2% пікселів [88].

Використання ж обох методів послідовно (тобто спочатку – SumThreshold, а потім PATROL) дає кращі результати, ніж кожного окремо.

2.2.3. Усунення дисперсійної затримки

Наступним етапом обробки є усунення впливу дисперсійного запізнення сигналів на різних частотах – дедиспергування [100–103].

Дисперсія (розсіяння) радіохвиль зумовлена іонізованим міжзоряним середовищем, тому що показник заломлення залежить від частоти. Він характеризується мірою дисперсії, яка визначається як інтегральна щільність

стовпчика вільних електронів на промені зору (між спостерігачем та джерелом випромінювання):

$$DM = \int_0^L n_e dl = \overline{n_e} L, \quad (2.3)$$

де n_e – концентрація електронів в одиниці об'єму, dl – елемент довжини уздовж променя зору, $\overline{n_e}$ – середнє значення n_e , L – відстань до джерела випромінювання.

Дисперсія спричиняє повільніше поширення (і пізніший час прибуття) того самого імпульсу джерела (наприклад, пульсара) на нижчих частотах, порівняно із вищими (рис. 2.15). Різниця в часі прибуття на двох частотах f_1 і f_2 може бути поражована як

$$\Delta t = K \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right) DM \quad (2.4)$$

де $K = 1/2.410331 \times 10^{-4} \text{ МГц}^2 \text{ см}^3 \text{ с/пк}$ [104]. Використовуючи рівняння (2.4) і знаючи точне значення DM , легко компенсувати дисперсійне запізнення (затримку), за допомогою переміщення сигналу на кожній частоті по відношенню до найвищої частоти в спостережуваному діапазоні. Після цього переміщення імпульс стає вирівняним на всіх частотах (як це було при його випромінюванні в магнітосфері пульсара) і стає можливим накопичення сигналу за допомогою частотного інтегрування. Цей метод називається некогерентним дедиспергуванням [85], який вводить частотно-залежний фазовий зсув до форми сигналу. Когерентний метод є ресурсозатратним, в той час як некогерентний – неточним, тому що частотна роздільна здатність даних скінченна. Для цілей Огляду (із часовою та частотною роздільною здатністю, що в ньому використовуються) точність некогерентного методу є достатньою. Результат некогерентного дедиспергування фрагменту даних із імпульсами пульсара показаний на рис. 2.15.

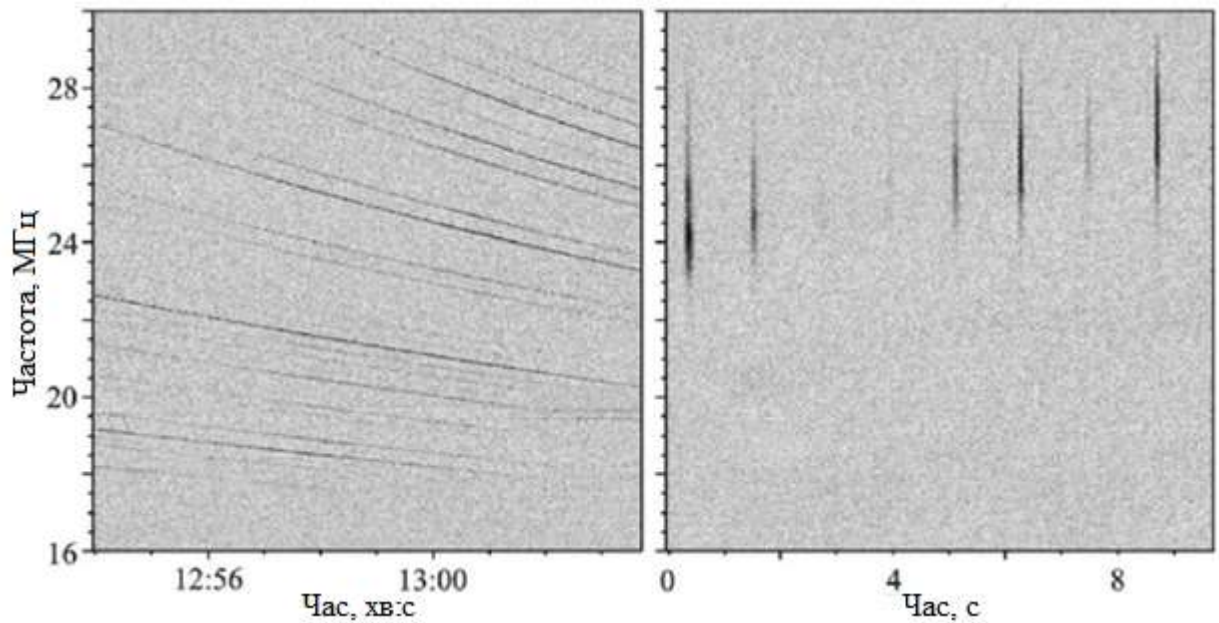


Рис. 2.15. Імпульси пульсара перед компенсацією дисперсійної затримки (ліва панель) і після неї (права панель).

Коли міра дисперсії невідома, потрібно дослідити її діапазон із певним кроком, намагаючись отримати найкраще випрямлення імпульсу, паралельне частотній осі. Якщо дисперсійна затримка є пере- чи недокомпенсованою (як на нижній і верхній панелі рис. 2.16, С/Ш імпульсу пульсара після частотного інтегрування є меншим, ніж у правильно дедиспергованого імпульсу (середня панель) [60].

Для віддалених джерел із великими значеннями DM , які спостерігаються в достатньо широкій смузі, навіть маленька неточність у компенсуванні DM призводить до значного зменшення співвідношення С/Ш. Отже, крок, із яким досліджуються різні значення DM в Огляді, має бути малим. Із іншого боку, він визначається часовою роздільною здатністю даних. Часовий зсув між верхнім і нижнім частотними каналами має бути більшим, ніж одна точка часової роздільної здатності. Крім того, розмір кроку (і відповідна кількість таких кроків) обмежений вимогою про час обробки, який був би можливим у крайньому випадку. Дедиспергування в діапазоні $0 < DM < 30 \text{ пк см}^{-3}$ проводилось із кроком 0.01 пк/см^3 (пояснення буде наведено в Розділі 3). Це відповідає 3000 «пробних» значень DM . При

кожному такому значенні до всіх 4096 частотних каналів даних застосовується окремий набір часових зсувів, відповідно до рівняння (2.4). Таблиця цих зсувів для всіх значень DM обчислюється попередньо (для швидшої обробки) та зберігається в бінарному файлі, до якого постійно звертається програма дедиспергування. Ця програма проходить періодично через кожен крок DM, здійснює частотно-залежні зсуви й інтегрує «зсунуті» фрагменти даних за частотою. Це повторюється 3000 разів, у результаті чого дані зменшуються приблизно в ~ 1.4 разу, оскільки 4096 частотних каналів перетворюються в 3000 інтегрованих часових рядів, кожен для окремого значення DM. Якщо на даному зображенні є сильний пульсар, він буде виглядати як послідовність імпульсів, яскравим і вузьким на своїй правильній DM і більш розмитим зі зменшеною інтенсивністю – у випадку, коли це значення відрізняється від його справжньої DM (рис. 2.17). Транзйентна подія виглядатиме як одиночний імпульс тієї самої форми.

Програма дедиспергування написана на мові C++ із міркувань швидкості роботи та майбутньої сумісності з технологією NVidia CUDA для паралельної обробки на графічних картках (GPU). До програми може бути поданий об'єднаний очищений файл або багато окремих файлів (для обробки в реальному часі). Вона резервує простір для часового зсуву даних, аж до максимально можливого (що відповідає $DM = 30 \text{ пк/см}^3$). Якщо йде робота з багатьма файлами, то програма буферизує в пам'яті частину наступного файлу для того, щоб заповнити пробіл, який формується в поточному файлі за допомогою частотно-залежного часового зсуву.

Коли дана програма запускається на робочій станції як один процес, вона займає 5 Гб RAM і обробка триває приблизно в 7 разів довше, ніж час спостереження. Тому якщо робоча станція має > 40 Гб RAM, то можна запустити паралельно 7 копій програми та досягти дедиспергування в реальному часі, у випадку використання достатньо потужного процесора (ЦП) (наприклад, Intel Core i7). Кожна копія програми, в такій ситуації, буде обробляти свою частину спостереження (файлів). Закінчивши очистку від

завад, IDL-лаунчер ініціалізує та запускає декілька копій програми C++, залежно від обсягу доступної RAM.

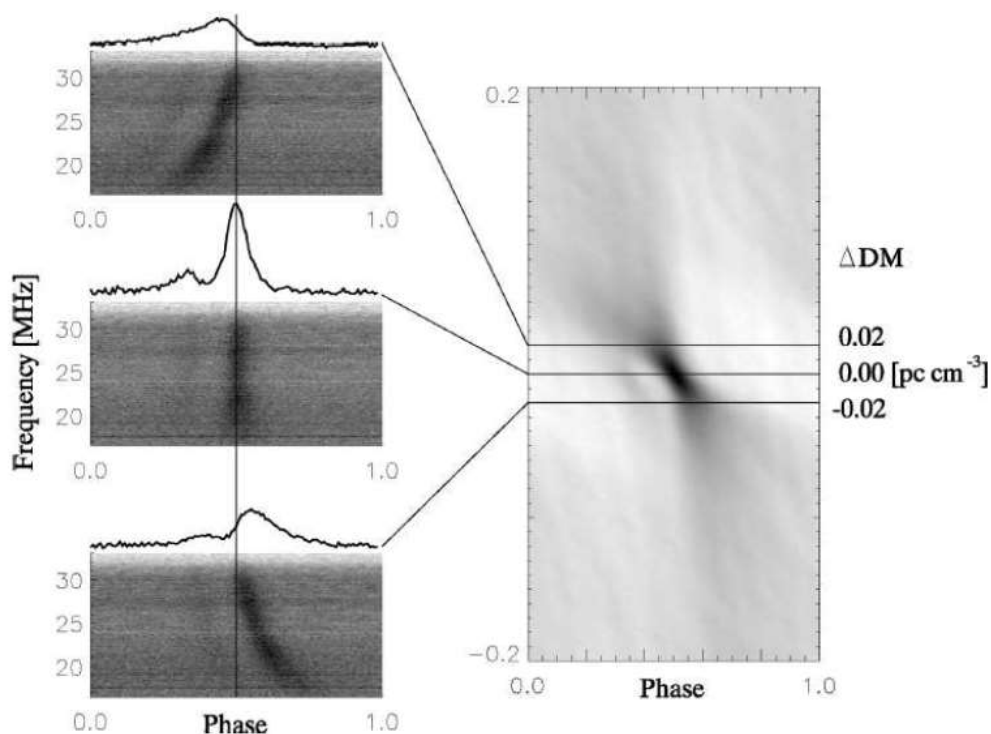


Рис. 2.16. Компенсація дисперсійної затримки: правильна (середня ліва панель), недокомпенсована (нижня ліва панель), перекомпенсована (верхня ліва панель) і С/Ш після спектрального інтегрування (права панель) [60].

Були спроби запустити обробку в квазі-реальному часі, але два сервери УТР-2 не мали достатньої кількості RAM для дедиспергування в реальному часі потоку даних від 5 приймачів. Дедиспергування даних є найдовшою та найдорожчою (з точки зору обчислювальної потужності) частиною всієї обробки даних Огляду. Але це також ідеальна процедура для паралелізації, тому що та сама дія повторюється багато разів (для різних пробних значень DM) із тим самим фрагментом даних. У даний час лише використання графічних карт може дозволити компенсувати дисперсійну затримку в реальному часі. Оціночне прискорення при використанні графічних карт буде приблизно в 60 разів [105].

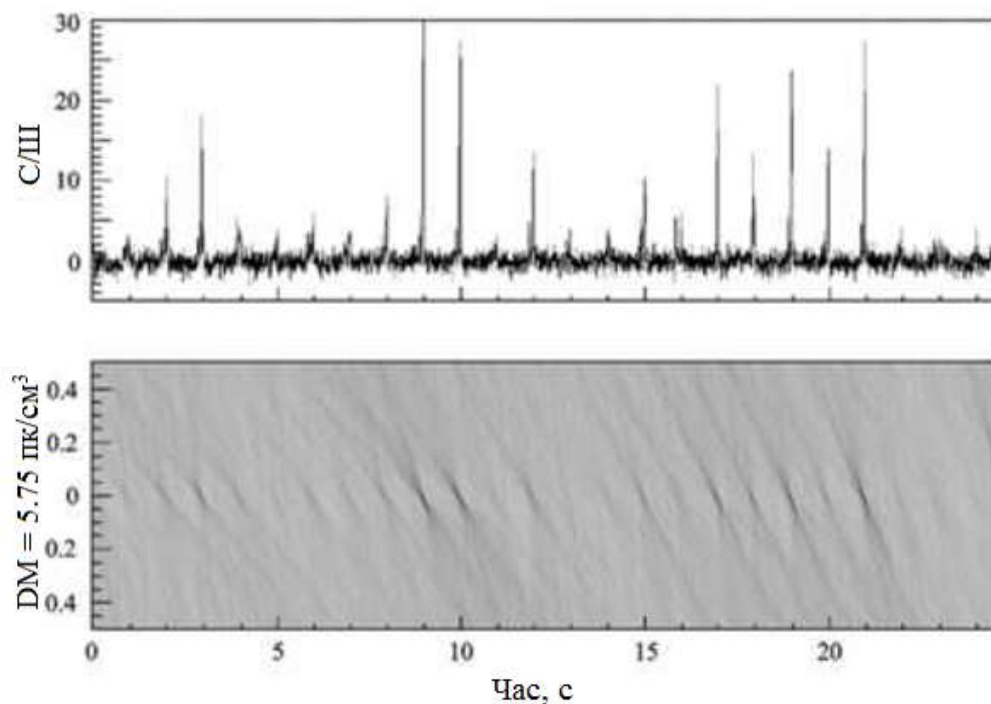


Рис. 2.17 . Індивідуальні імпульси PSR B0809+74 на площині «Міра дисперсії – Час» (нижня панель). Часові послідовності відповідають $DM = 5.75 \text{ ПК/СМ}^3$, тобто правильному значенню DM для PSR B0809+74 (верхня панель).

Із поточним станом обладнання та програмного забезпечення, можливою є очистка від завад он-лайн. Завдяки фрагментарній структурі сирих даних, можна почати обробку майже «на льоту» – негайно після запису першого файлу. Після того, як певний файл досягне свого повного розміру, він надсилається до конвеєру.

Врешті-решт, онлайн-обробка не була повністю реалізована на УТР-2 через мережеві помилки, обмежений обсяг RAM і дисковий простір, але є надія, що вона буде включена до стандартної програми вже в найближчому майбутньому.

2.2.4. Пошук індивідуальних імпульсів

Останнім етапом автоматичної обробки є пошук індивідуальних імпульсів в очищених і вже дедиспергованих даних. Програма знаходить і

позначає всі сигнали, що перевищують 5.5σ (СКВ) і створює зображення – графіки з осями «Час – Міра дисперсії». На даних зображеннях відліки, інтенсивність яких перевищує задане порогове значення, позначаються червоними колами. Діаметр цих кіл прямопропорційний співвідношенню «Сигнал/Шум» кожного сигналу, якщо ж імпульс має досить велике значення С/Ш, проте триває надто короткий час, то він позначається просто порожнім колом – «кільцем» [71, 106–108]. Далі це буде описано детальніше.

Результати дедиспергування, показані в координатах «Міра дисперсії – Час», включають 3000 часових послідовностей, інтегрованих за частотою, що відповідають 3000 різних значень мір дисперсії, кожна довжиною 2^{16} точок (~ 520 секунд).

Наступним етапом обробки є пошук потужних подій на площині «Час – Міра дисперсії». Тут під назвою «події» маються на увазі точки (імпульси після дедиспергування та частотної інтеграції), які перевищують обраний поріг у часовій послідовності. Часові послідовності можуть містити довготермінові варіації, що спричинені змінами в Галактичному фоні й іоносфері під час спостережень, які слід видалити, щоб правильно обрати поріг при пошуку сигналів. Це було зроблено за допомогою фільтрації верхніх частот, тобто відніманням від початкових часових послідовностей, які були оброблені фільтром низьких частот. Залишаються всі варіації, які коротші ~ 4 секунд. Припускається, що через розсіяння в міжзоряному середовищі, неможливо зустріти коротких піків із тривалістю порядку ~ 1 відліку часової шкали (8 мс). Таким чином, також відфільтровуються короткі шкали часу, шляхом обчислення середнього показника 4 і більше сусідніх точок даних. Тому найкоротший масштаб «подій» стає 32 мс. Ці параметри фільтрації були обрані емпірично, під час обробки тестових наборів даних відомих пульсарів, записаних так само, як і дані Огляду.

Після цих двох фільтрацій (високочастотної і низькочастотної), «кадр» даних, розміром 2^{16} точок, ділиться на 16 менших субкадрів, кожен тривалістю ~ 32.5 с. Кожна з результируючих 3000 часових послідовностей

перевіряється в субкадрі на наявність подій, що перевищують поріг $\mu + 5.5\sigma$, де μ та σ – це середнє та стандартне відхилення часової послідовності, що рахується ітеративно, за допомогою постійного викидання найбільших піків при кожній ітерації, доки не буде досягнуто рівня шуму. Якщо знаходиться подія, що перевищує цей поріг, її параметри (С/Ш, DM і час появи з моменту початку спостережень) записуються до вихідного файлу «бази даних». Вибір порогу 5.5σ є також емпіричним компромісом. Якщо обирається нижче значення – то до бази даних просочується забагато зайвих подій, таких як сліди слабких завад або краї імпульсів пульсарів, які розмиті в певному діапазоні мір дисперсії довкола справжньої DM пульсара. Якщо ж більше – то можна втратити інтенсивні сигнали космічних джерел.

Отже, перші три етапи обробки: очистка від завад, дедиспергування (усунення дисперсійного запізнення імпульсів на низьких частотах по відношенню до високих) і автоматичний пошук імпульсів складають так званий «довгий конвеєр». Довгий конвеєр – це сукупність автоматизованих кроків для підготовки даних для подальшого аналізу.

Як було сказано вище, для кращої візуалізації та подальшої візуальної перевірки, на місці кожної знайденої події малюється червоне коло. Радіус цього кола пропорційний тому, наскільки даний сигнал перевищує поріг 5.5σ . Зазвичай події займають декілька сусідніх точок за часом та DM і кожна створює своє коло, тому вони перекриваються в стиснутому масштабі та формують червоні диски. Зображення підкадру з накладеними колами подій зберігаються для подальшого відбору кандидатів. Приклад такого зображення показаний на рис. 2.18. Диск із мірою дисперсії ~ 22.7 пк/см³ є прикладом кандидата в транзієнти.

Спостерігач перевіряє події, що автоматично позначені червоними колами, на відповідність таким критеріям: 1) події мають бути одиночними та не бути частиною жодної структури. Всі розширені структури, найімовірніше, продукуються завадами. 2) індивідуальні імпульси після дедиспергування та частотного інтегрування повинні мати $C/S > 6$; 3) коло

не повинно бути пустим (яке показує подію в одній точці часової роздільної здатності).

Приклад детектування пульсара (в серії послідовних імпульсів) показаний на рис. 2.19. Події з різною інтенсивністю повторюються на тому самому значенні $DM = 12.88 \text{ пк/см}^3$, що відповідає мірі дисперсії PSR B0834+06 [60].

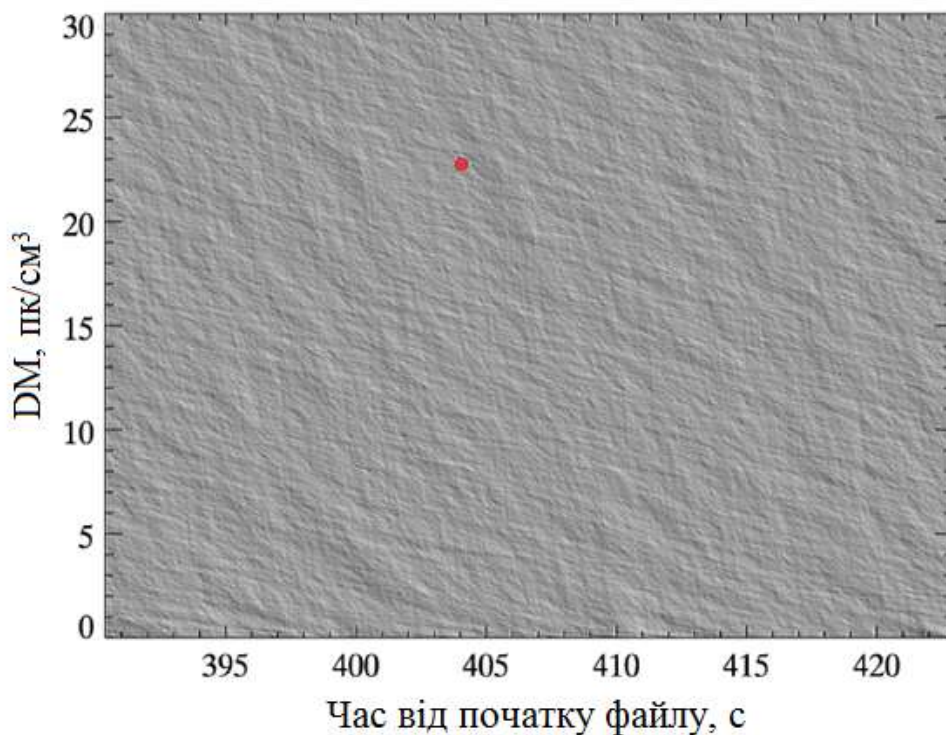


Рис. 2.18. Результат роботи програми пошуку індивідуальних імпульсів. Червоний диск у верхній частині діаграми є прикладом кандидата в транзйєнти з $DM \approx 22.7 \text{ пк/см}^3$.

Підкадр даних із залишковими завадами показаний на рис. 2.20. Тут події формують з'єднану форму (структуру), поширюючись на певний діапазон значень DM і створюючи багато хибно позитивних детектувань.

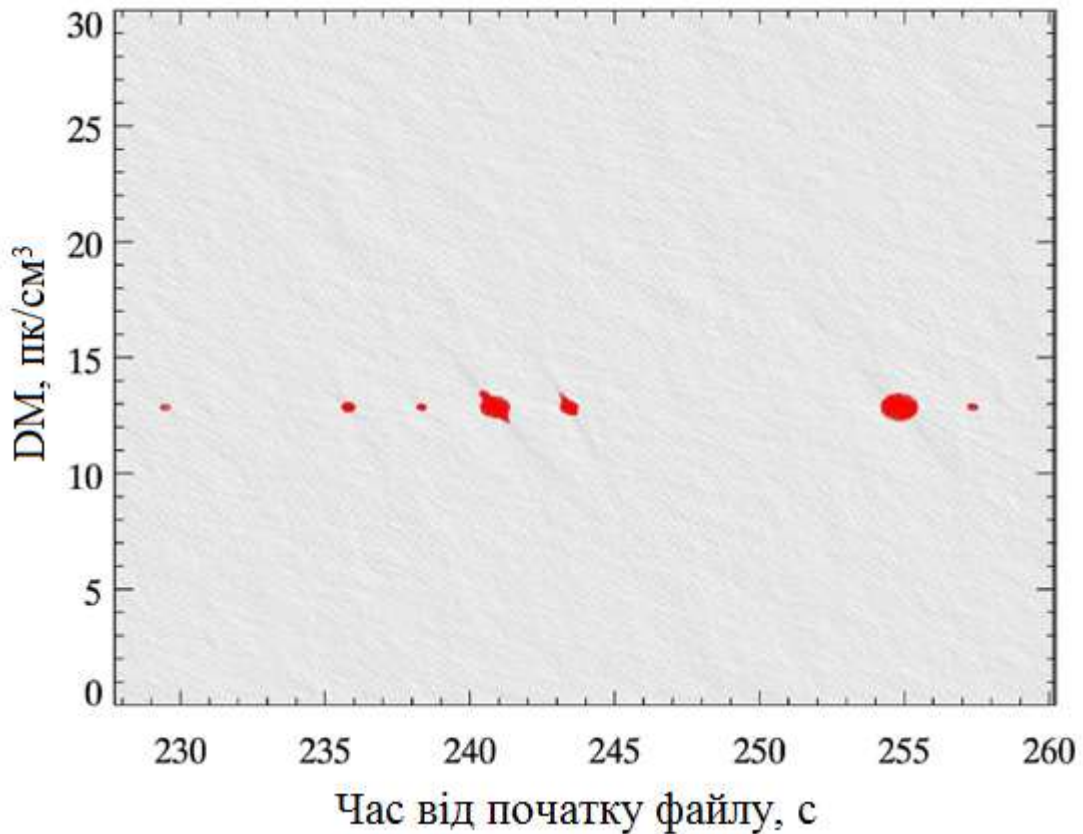


Рис. 2.19. Результат роботи програми пошуку індивідуальних імпульсів. Послідовність червоних кіл на $DM = 12.88 \text{ ПК/СМ}^3$ є прикладом детектування пульсара.

Інколи завади, які не були видалені під час автоматичної обробки, можуть формувати певні структури. Ці структури імітують справжній сигнал, що концентрується у вузькому діапазоні значень DM (рис. 2.21, верхня панель). Ці події вводять в оману, їх можна сплутати з потужними кандидатами в транзієнти. Для того, щоб усунути такі неоднозначності, необхідно повернутися до первинних даних і дедиспергувати сирий, динамічний спектр по відношенню до DM, на якій проявився той чи інший сигнал. Якщо слід події після дедиспергування є паралельним осі частот, то це означає, що сигнал відповідає часово-частотній залежності, яка характерна для космічних сигналів ($\sim f^{-2}$). Тому це, найімовірніше, сигнал від космічного джерела. Якщо після дедиспергування подія має форму, що відрізняється від прямої лінії (рис. 2.21, нижня панель), то це означає, що її часово-частотна

затримка відрізняється від затримки, що викликана поширенням крізь холодну плазму міжзоряного середовища й тому, найімовірніше, така подія є земною завадою.

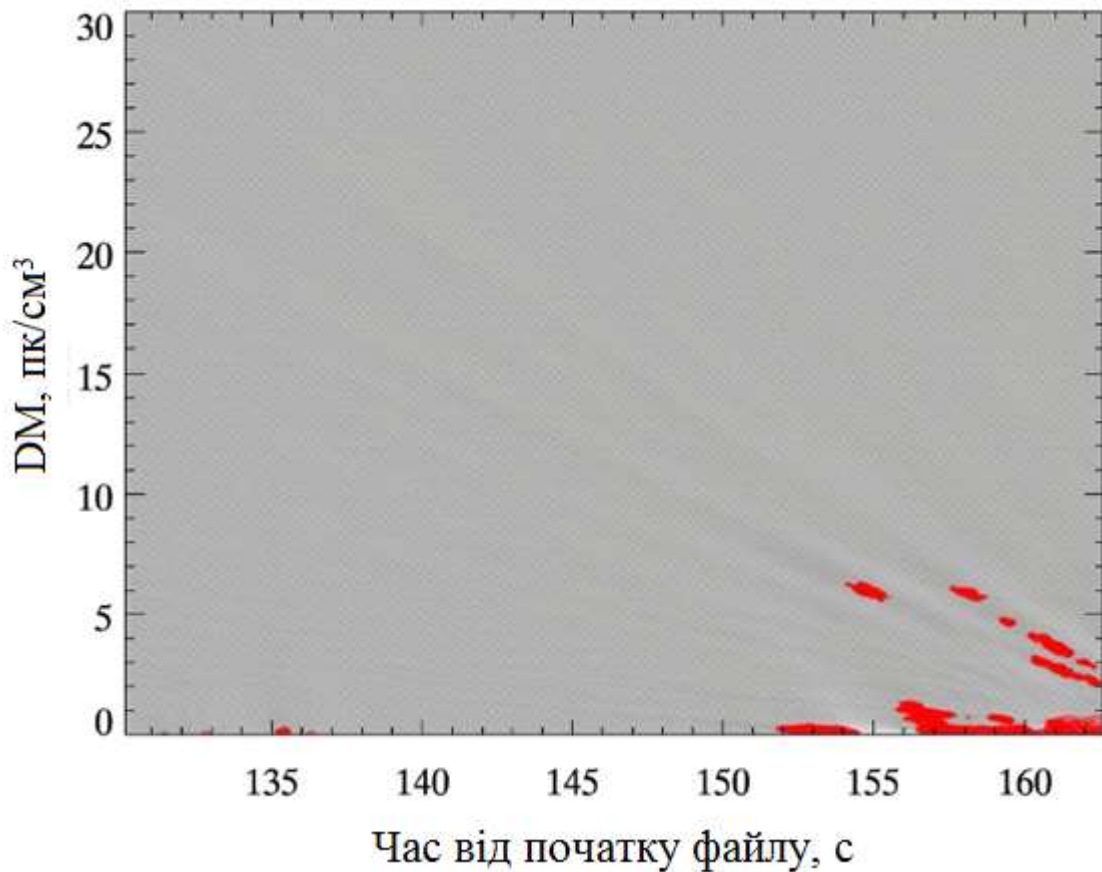


Рис. 2.20. Результат роботи програми пошуку індивідуальних імпульсів. Червоні кола, що формують обширну структуру, є залишковими, широкосмуговими завадами.

Параметри (DM, С/Ш, час) всіх подій, які були знайдені в записах одного приймача протягом спостережної ночі (13 год), зберігаються до окремого .dat-файлу. Цей файл потім аналізується для того, щоб побачити, на яких значеннях DM сталися події. Створюються два сумарні графіки для спостережних даних кожної ночі кожного приймача. Перший – графік «Розкид мір дисперсії, на якій сталася подія – Час, в який вона сталася». С/Ш тут не показується. Здебільшого, цей графік використовується для пошуку можливих залишків завад. Найчастіше завади з’являються на низьких

значеннях мір дисперсії, здебільшого на $DM = 0$. Тут шкала часу дуже стиснута, але інколи (як на рис. 2.22, нижня панель) можна побачити послідовність імпульсів, що повторюються на тій самій DM . На цьому зображенні показані імпульси пульсара PSR B0834+06.

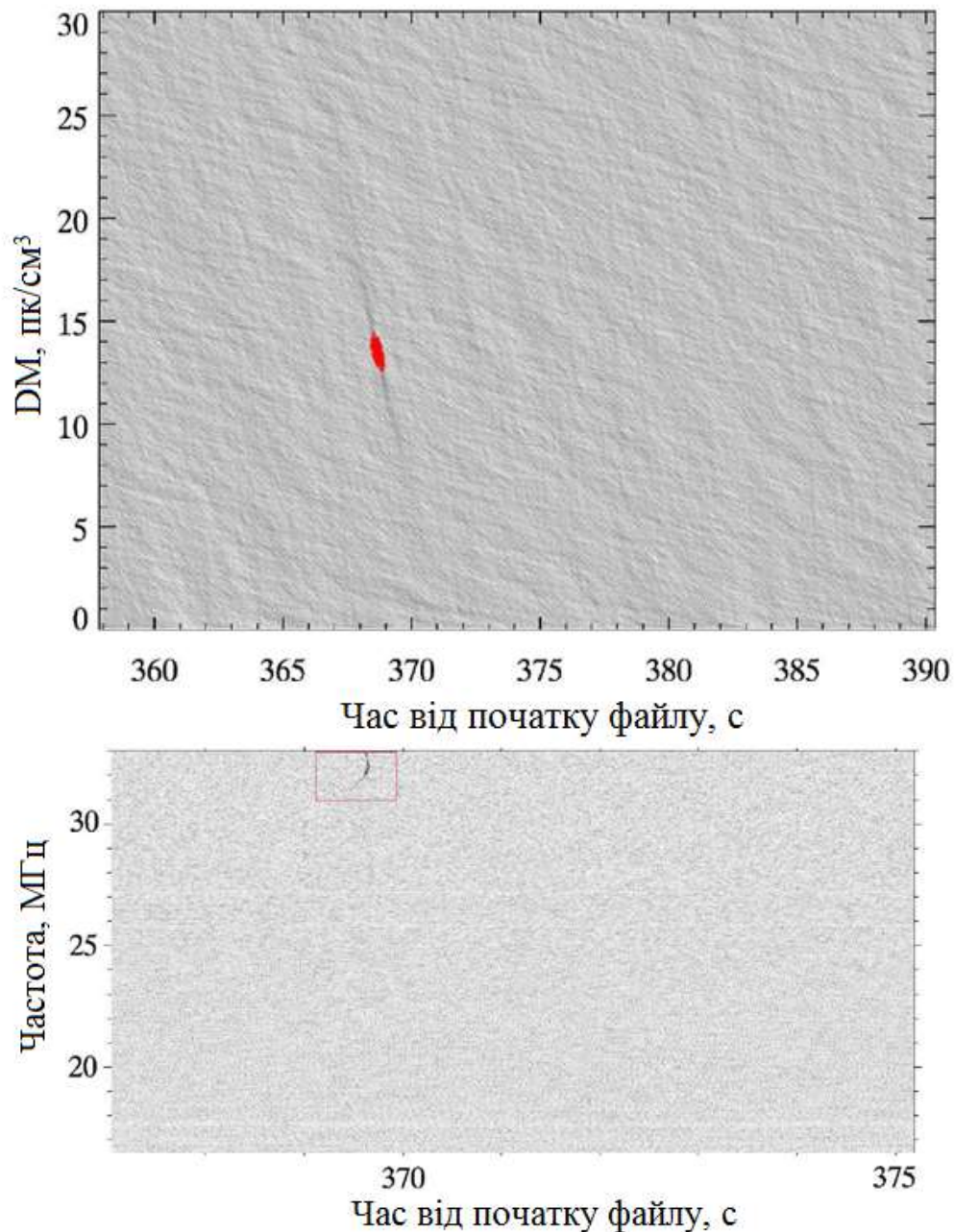


Рис. 2.21. Результат роботи програми пошуку індивідуальних імпульсів. Верхня панель: подія займає невеликий діапазон DM , але тим не менше є завадою. Нижня панель: після дедиспергування сирого динамічного спектру

виявляється, що подія має часово-частотну залежність, відмінну від очікуваної для космічних сигналів.

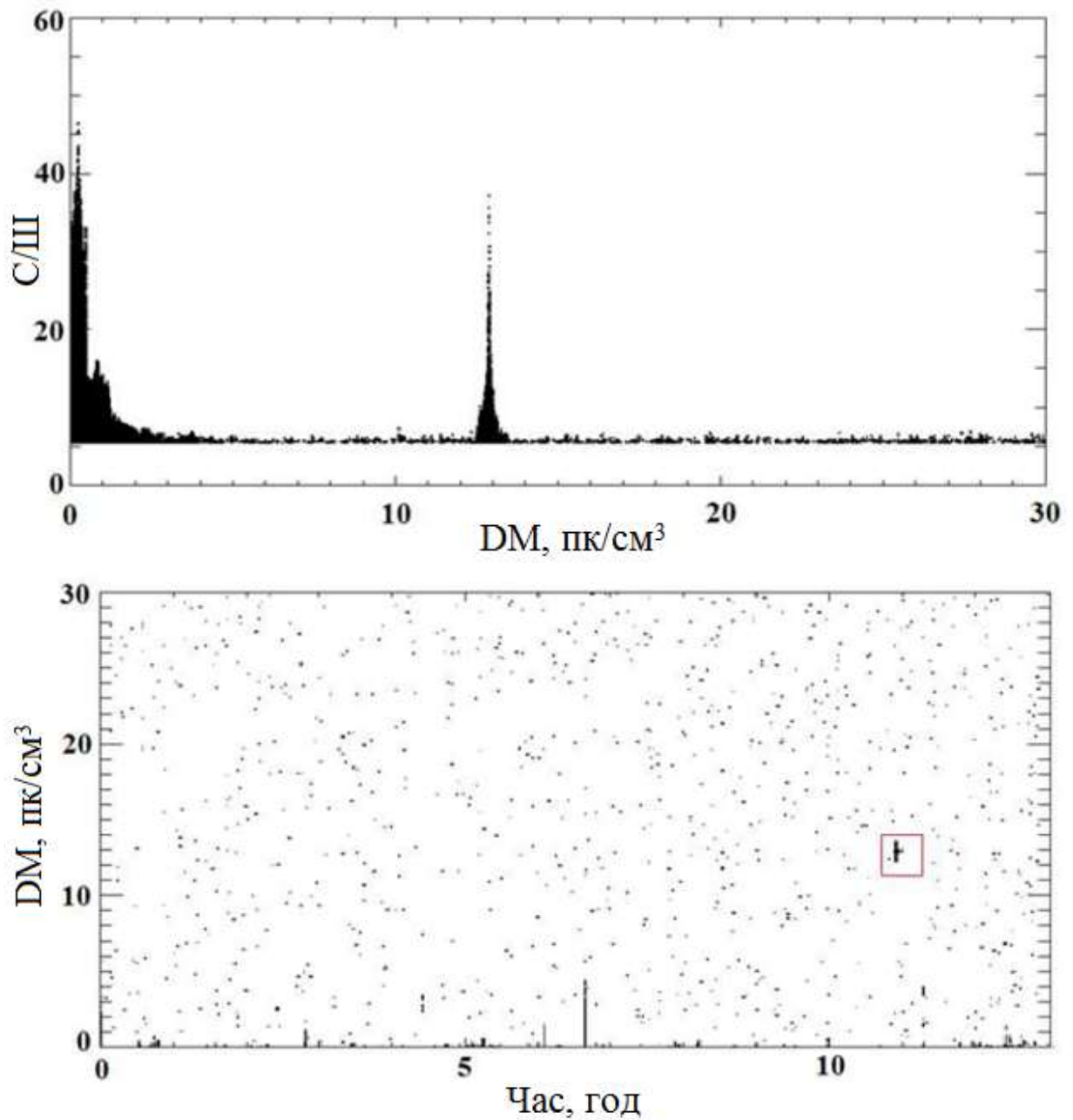


Рис. 2.22. Верхня панель: сумарний графік «С/Ш подій – DM», пік відповідає мірі дисперсії PSRB0834+06. Нижня панель: сумарний графік «DM події – Час появи». Виділена область містить події, пов'язані із PSR B0834+06.

Другий сумарний графік (рис. 2.22, верхня панель) є графіком «Розкид С/Ш кожної події – DM». Кожна точка є одиночною подією, С/Ш якої

перевищує поріг 5.5σ . Якщо на цьому сумарному графіку є пік, то це означає, що було багато подій із різною інтенсивністю на тому самому значенні DM. Це слід пульсара або транзієнта, чиє випромінювання повторюється. Пік на рис. 2.22 відповідає мірі дисперсії пульсара PSR B0834+06. Схилення $+6^\circ$, що відповідає коду Огляду, який спостерігався тієї ночі, також підтверджує, що це був саме той пульсар.

Для зручності даний графік побудований програмою, що має інтерактивну функціональність. Позначення вказівником «миші» дозволяє показати координати події (DM і С/Ш). Потім, поблизу обраної координати DM ($DM \pm 0.2 \text{ пк/см}^3$) програма шукає подію з максимальним С/Ш. На виході вона видає С/Ш імпульсу, значення DM, час появи та посилення на сирий файл даних, який містить дану подію, для візуальної перевірки.

Тож, спочатку програма пошуку індивідуальних імпульсів створює описані вище картинки – візуалізує всі записи, позначаючи червоними колами події, що перевищують задані порогові значення. Після цього здійснюється візуальна перевірка цих зображень дослідником, із метою пошуку серед усіх позначених сигналів тих, які найбільше схожі на космічні (відповідають встановленим критеріям). Після ручного відбору цих кандидатів, запускається вищезгадана програма з інтерактивною функціональністю. Далі показаний приклад її роботи на обробці запису променя А коду V887 від 2.11.2011 року. При ручному відборі було обрано декілька підходящих кандидатів. Перший із них був виявлений на 9-ій картинці (із 16) 1-го файлу даного запису (промінь А коду V887 від 2.11.2011), тому даною програмою спочатку відкривається .dat-файл відповідного коду/променя/дати (що автоматично створений на попередньому етапі програмою автоматичного пошуку імпульсів). Після цього в поля її вікна «Pictfile» і «Subpict» вводяться значення, що відповідають першому відібраному кандидату (1 і 9, відповідно) (рис. 2.23). Після натискання на клавішу «Done», автоматично відкривається обране таким чином зображення з потрібним кандидатом (рис. 2.24). Після натискання на

область, що містить його (кандидата), програма автоматично обирає оптимальну DM, при якій С/Ш стає максимальним, і записує ці та деякі інші параметри до нової бази даних, котра містить вже лише найбільш вірогідних кандидатів, перевірених візуально. Далі з'являється наступне вікно (рис. 2.25), що дозволяє: а) «Stay here» – лишитися на даному зображенні та додати (аналогічно попередньому) ще одного кандидата до бази, якщо він міститься в цій самій частині файлу (на 9-ій із 16 картинок першого файлу); б) «Next picture» – перейти на будь-який інший файл і картинку в межах даного запису та додати нового/нових кандидатів до бази даних (аналогічно тому, як показано на рис. 2.23 та рис. 2.24); в) «Exit file» – завершення створення бази даних кандидатів цього променю та коду (натискається, коли вже доданий до бази останній кандидат даної смуги запису). Результат її роботи показаний на рис. 2.26. Це зображення бази даних параметрів сигналів-кандидатів вищезгаданого променю/коду/дати (V887_A_Nov2011). Вона містить декілька стовпчиків параметрів, а саме (зліва направо):

- 1) Час, коли сталася подія (в секундах від початку запису);
- 2) Пряме піднесення (RA) області неба, яка записувалася в той момент (год);
- 3) Схилення області неба, куди був направлений центральний промінь телескопу (δ) (градуси);
- 4) Міра дисперсії події (пк/см^3);
- 5) Автоматично отриманий С/Ш.

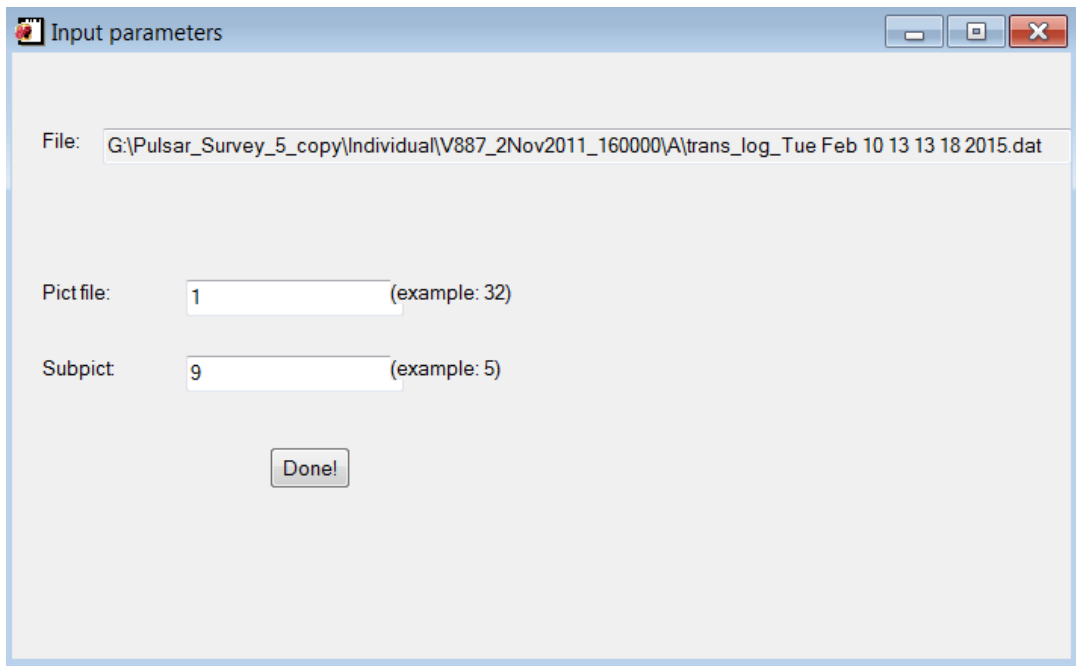


Рис. 2.23. Первинне вікно інтерактивної програми.

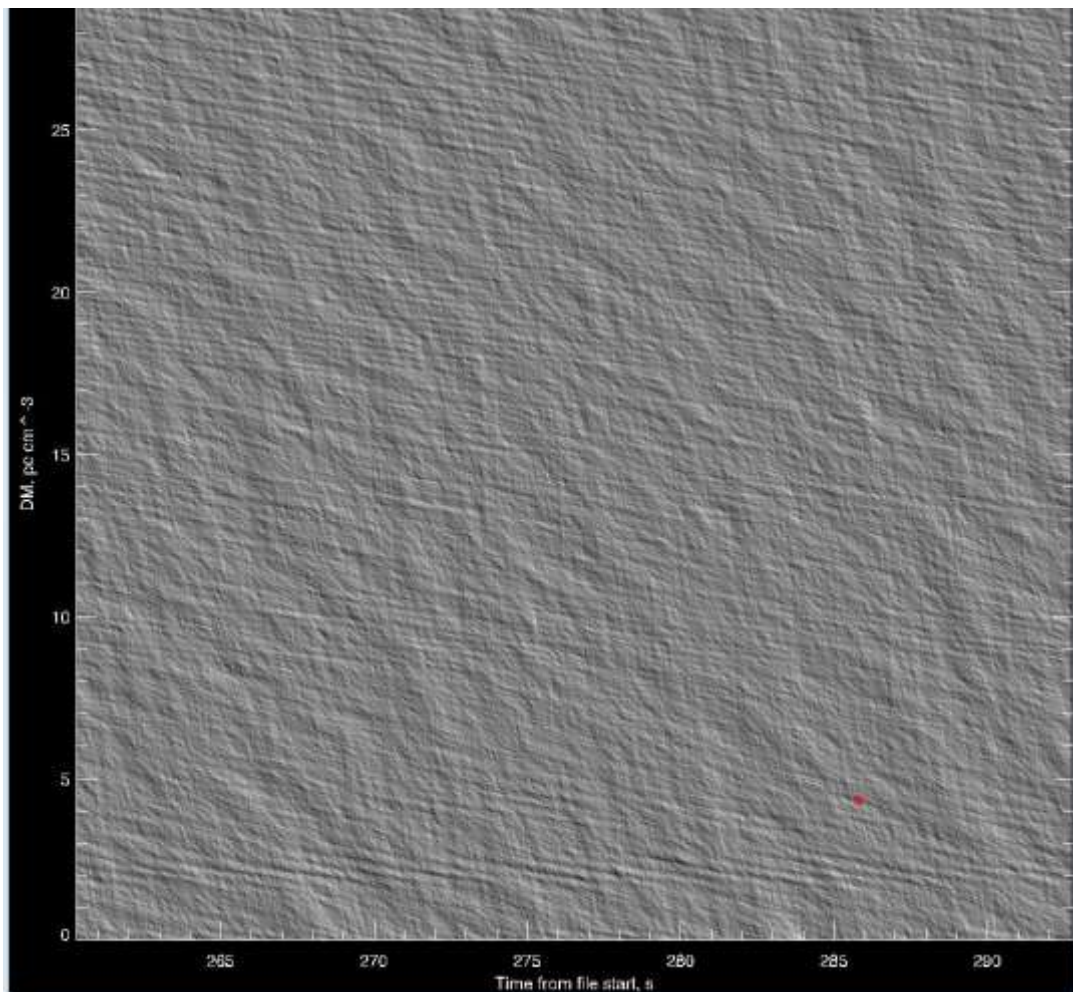


Рис. 2.24. Вигляд інтенсивного сигналу на площині «Міра дисперсії – Час» перед додаванням його до бази даних.

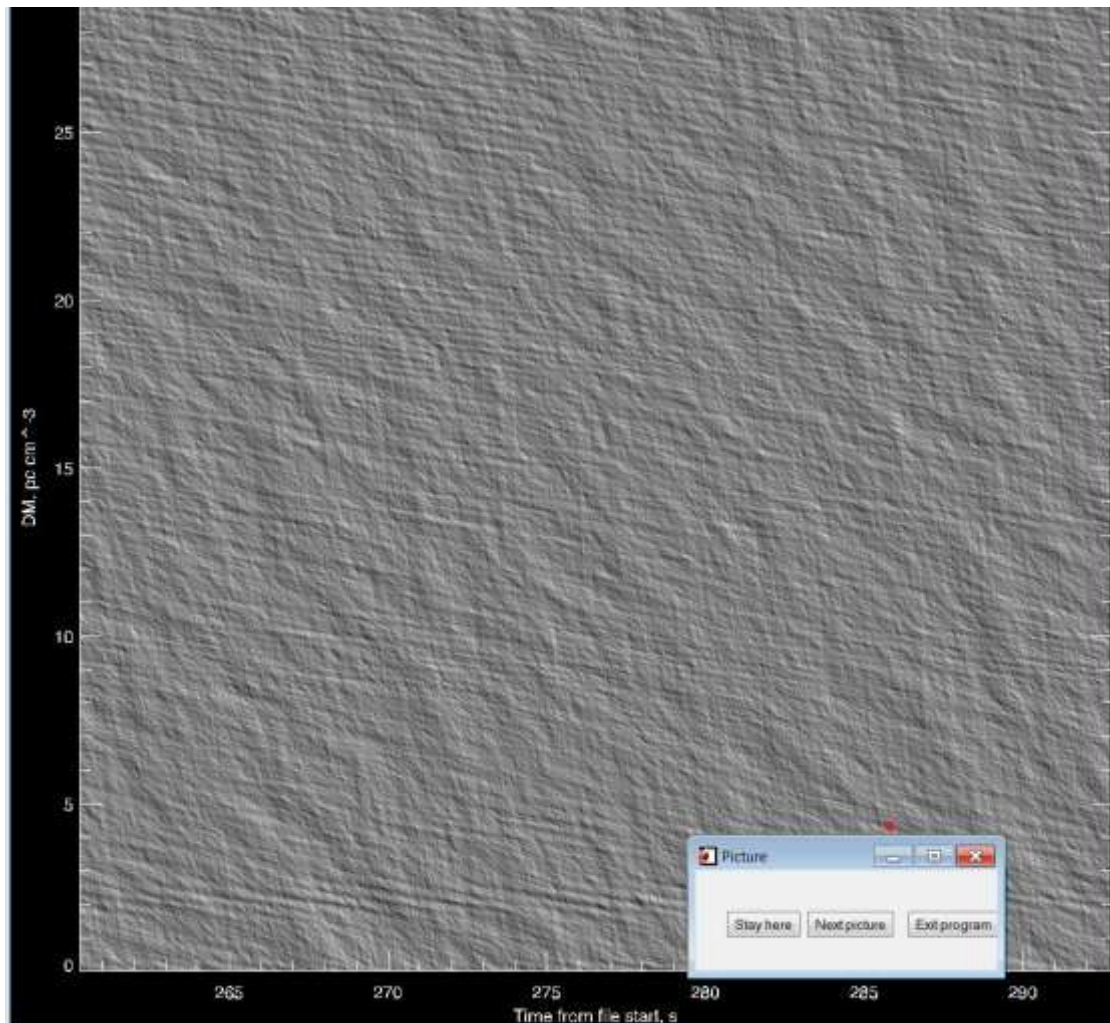


Рис. 2.25. Результат вибору сигналу на площині «Міра дисперсії – Час»: можна додати інший сигнал із цієї частини файлу, перейти до іншої частини файлу або завершити створення бази даних.

G:\Pulsar Survey 5 copy\Individual\V887 2Nov2011 160000\A\Events maxima V887 2Nov2011 160000 A 11 events.trr

285.832;	21.303276;	-12.043092;	4.3299999;	6.0178647
1234.35;	21.566753;	-12.043092;	17.570000;	6.1319795
4979.90;	22.607185;	-12.043092;	15.440000;	6.0323620
9145.71;	23.764354;	-12.043092;	20.690001;	6.0957675
12023.3;	0.56367697;	-12.043092;	6.3200002;	6.0887599
13486.5;	0.97014131;	-12.043092;	22.379999;	6.1512232
25660.9;	4.3519072;	-12.043092;	26.520000;	6.1093597
35706.5;	7.1423477;	-12.043092;	20.840000;	6.2257605
42378.6;	8.9957155;	-12.043092;	11.320000;	6.1029434
44033.7;	9.4554581;	-12.043092;	19.190001;	6.1666088
45469.6;	9.8543133;	-12.043092;	13.370000;	6.0906863

Рис. 2.26. Результуюча таблиця, що містить параметри обраних і доданих сигналів.

Враховуючи, що типовий імпульс пульсара має максимум на точному значенні DM пульсара та стає розмитим поблизу нього, то найінтенсивніші

точки подій автоматично обираються як істинна міра дисперсії кандидата. Маючи обрану точку в піку (рис. 2.22, верхня панель), програма видасть правильне значення DM для PSR B0834+06: $DM = 12.88 \text{ пк/см}^3$ (із точністю, еквівалентною розміру кроку $= 0.01 \text{ пк/см}^3$).

Кожен пік на графіку потім перевіряється на те, чи це відомий пульсар, чи джерело, яке поки що не було відкрито. Для цього порівнюється значення DM кандидата, отримане з описаного вище інтерактивного обирання, та DM відомих пульсарів. Спочатку перевіряються міри дисперсії 40 пульсарів, які вже були надійно продетектовані на УТР-2 [60]. Потім дане значення шукається в каталозі пульсарів ATNF [61]. Якщо збігу не знайдено, то джерело слід проспостерігати ще раз під час майбутніх спостережень, щоб підтвердити чи спростувати відкриття нового джерела. Якщо ж співпадіння за DM знайдено, але приблизні координати кандидата значно відрізняються від координат пульсара з каталогу, то такий об'єкт також залишається для повторного спостереження.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

У розділі була поставлена задача огляду Північного неба з метою пошуку джерел спорадичного радіовипромінювання декаметрових хвиль (Огляду), що була втілена у його концепцію. Основною відмінною ознакою даного дослідження є тривале накопичення сигналів (до 1 год) для всіх напрямків, незалежно від галактичних координат і невеликий час отримання повного, одноразового набору спостережних даних. Це дозволяє досягти однакової чутливості для найближчого галактичного оточення (декілька кілопарсек), де джерела розташовуються майже рівномірно.

Були проведені спостереження з метою повного покриття доступної частини неба, в результаті чого отримані приблизно 100 Тб спостережних даних. Виходячи з необхідності боротьби з завадами, розроблені програми обробки даних змінювалися та вдосконалювалися відповідно до поточних потреб. На прикладі потужних пульсарів була відпрацьована методика візуального контролю – відбору кандидатів у джерела транзієнтного радіовипромінювання.

Після цього за допомогою візуального контролю всі візуалізовані дані (більше 500000 зображень) були перевірені на наявність сигналів, що відповідають встановленим критеріям для сигналів космічної природи. В результаті було виявлено приблизно 3350 кандидатів, що відповідають вищезгаданим критеріям.

Наступною задачею було детально проаналізувати кожен із цих сигналів окремо, у всій частотній смузі. Для цього був розроблений комплекс програм, про який ітиме мова в наступному розділі.

Основні положення та результати цього розділу викладені в публікаціях автора [10, 90–91, 100–103, 106–109].

РОЗДІЛ 3

РЕЗУЛЬТАТИ. ВИЯВЛЕННЯ ІНДИВІДУАЛЬНИХ ІМПУЛЬСІВ КОСМІЧНИХ РАДІОДЖЕРЕЛ

У даному розділі описані основні результати дисертаційної роботи. До них, у першу чергу, відносяться знайдені в Огляді транзйентні сигнали, які мають низку ознак космічного походження (кандидати), розроблений комплекс програм для детального аналізу кожного індивідуального імпульсу (так званий «короткий конвеєр»); результати тестування кандидатів на наявність ознак завадового походження та статистичні характеристики відібраних, врешті-решт, подій, які достатньо впевнено можна віднести до транзйентних сигналів космічної природи.

Наведені залежності кількості знайдених сигналів від часу з моменту початку спостережної сесії. Показано, що після усунення завад зі значеннями міри дисперсії близько 0, події розподіляються за часом появи досить рівномірно.

Також, для розділення сигналів космічного походження (що повинні мати тільки запізнення низьких частот по відношенню до високих) та завад (які можуть мати будь-яку залежність часу приходу сигналу від частоти), вперше запропоновано та проведено тест пошуку сигналів зі «зворотньою» мірою дисперсії. У випадку, якщо в записах одночасно зустрічалися б сигнали з «прямою» та «зворотньою» мірами дисперсії, такі імпульси, скоріш за все, можна було б віднести до штучних завад або мерехтінь континуального випромінювання космічних джерел в іоносфері. Для проведення цього тесту отримані дані спостережень були інвертовані за часом. Якщо мерехтіння або завади штучного походження присутні в даних, то можна припустити, що сигналів із випередженням низьких частот по відношенню до високих буде приблизно стільки ж, як і з запізненням. Тобто часово-частотна залежність таких сигналів пропорційна не f^{-2} , – f^{-2} . Ці

сигнали оброблялися, як і звичайні «кандидати», проте перевірка 10% записів і перших ста знайдених сигналів, які перевищили поріг 5.5σ , показала, що жоден такий сплеск не відповідає критеріям, якими характеризуються широкосмугові космічні сигнали з дисперсійною затримкою. Таким чином, можна стверджувати, що знайдені сигнали-кандидати не можуть бути згенеровані іоносферними мерехтіннями чи належати до якогось типу штучних завад, які досить часто повторюються.

Також були побудовані та проаналізовані розподіли продетектованих імпульсів за співвідношеннями С/Ш, галактичною широтою та мірою дисперсії. Вигляд цих розподілів, а також порівняння їх із розподілами відомих пульсарів та інших джерел радіовипромінювання, також свідчить про космічну природу знайдених сигналів.

Можливі джерела продетектованого випромінювання, а також висновки за розділом обговорюються в заключній його частині.

3.1. Пошук індивідуальних космічних імпульсів

Як було сказано в попередньому розділі, після очистки даних від завад і дедиспергування, програмою автоматичного пошуку імпульсів було виявлено багато тисяч сигналів, що перевищують встановлені порогові значення за інтенсивністю. Всі дані були візуалізовані (16 картинок на один 8-хвилинний файл – всього приблизно 550 тисяч зображень) та проаналізовані. Це дозволило обрати з усіх виявлених сигналів близько 3300 із мірою дисперсії більше 1.5 пк/см^3 та таких, які не належали до жодних структур, що характерно для потужних і відносно вузькосмугових завад.

Ці кроки з відсіювання великої кількості завадових сигналів були необхідні для того, щоб почати аналізувати кожен сигнал-кандидат окремо. Маючи досвід дослідження окремих аномально інтенсивних імпульсів пульсарів, можна сформулювати деякі критерії для розрізнення сигналів космічних джерел і сигналів, які, ймовірно, є завадами штучного або природного походження. До них можна віднести широкосмуговість, частотну

залежність дисперсійного запізнення, пропорційну f^{-2} , низьку інтенсивність, відсутність частотних особливостей та ін. Спочатку сигнали аналізувались індивідуально, була показана необхідність підстроювання міри дисперсії та параметрів детектування імпульсів. Була розроблена програма багатопараметричного аналізу, яка дозволяє інтерактивно змінювати критерії детектування, варіювати міру дисперсії, уточнювати час приходу сигналу для того, щоб отримати більш точні значення його параметрів: міри дисперсії, характерної тривалості та ін.

Конвеєр обробки даних, частина якого була описана в попередньому розділі, складається із двох частин: повністю автоматизованої частини – «довгого конвеєра» (обробка всього масиву отриманих даних), який виявляє сигнали, що перевищують обраний пороговий рівень 5.5σ – та аналізу зображень із напівавтоматичним вибором сигналів, які не мають явно завадового вигляду.

Проте цього виявилось абсолютно недостатньо для подальшого аналізу даних і підтвердження космічної природи виявлених транзйєнтних сигналів.

У Розділі 1 були згадані роботи, в межах яких здійснювалися пошуки джерел імпульсного космічного радіовипромінювання. При дослідженні в оглядах пульсарів, їх основними параметрами є періоди та профілі середніх імпульсів. Для транзйєнтних сигналів цього зробити не вдається, тому є смисл проаналізувати, як проводяться дослідження радіотранзйєнтів, що обертаються. У випадку із цими джерелами, важливими критеріями космічної природи сигналів є просторові розподіли, розподіли за мірою дисперсії (і подібність їх розподілам пульсарів), не дуже висока інтенсивність сигналу, дуже точна відповідність закону дисперсійного запізнення і (на високих частотах) наявність розширення сигналу в напрямку низьких частот (що говорить про зростання розсіяння, як і має бути у випадку детектування космічних сигналів).

Одним із крупних низькочастотних радіотелескопів є LOFAR. У [63] автори повідомляють про детектування 48 мілісекундних пульсарів (МСП) із

75, що спостерігалися на той момент, за допомогою LOFAR у частотному діапазоні 110–188 МГц. Автори наводять середні профілі імпульсів виявлених пульсарів, ефективні ширини імпульсів і щільності потоків, а також порівняння з більш високочастотними спостереженнями. Також надаються середні значення мір дисперсії й обговорюються варіації профілів і DM. Близько 35% МСП мають дуже вузькі профілі, інші 25% – розмиті профілі, а решта – слабо продетектовані. Якісне порівняння профілів МСП на LOFAR із ними ж на вищих радіочастотах демонструє постійне розділення між компонентами профілю.

У роботі [64] презентовані перші результати перепису непідкручених (одиначних) пульсарів на LOFAR. Даний огляд включає майже всі відомі такі джерела (194) на схиленнях $\delta > 8^\circ$ та галактичних широтах $|b| > 3^\circ$, незважаючи на їх очікувані щільності потоків і часи розсіювання. Кожен пульсар спостерігався 20 і більше хвилин у частотному діапазоні, близькому до 110–188 МГц. У роботі представлені міри дисперсії, щільності потоків і калібровані профілі повної інтенсивності для 158 пульсарів, продетектованих у даній вибірці. Для кількох пульсарів були порівняні спектральні індекси з різних робіт і був виявлений типовий розкид значень: 0.5–1.5, що свідчить про, переважно, недооцінку похибок спектральних індексів у літературі.

У цих роботах, як і в багатьох інших пошукових оглядах пульсарів, повторюваність імпульсів є найважливішим доказом наявності джерела космічного випромінювання. Транзйентні сигнали практично не підлягають накопиченню по частоті, оскільки це замиває закон частотно-часової залежності сигналу.

У роботі [51] розглянуті й описані проблеми та методи пошуку швидких радіотранзйентів. На 2003 рік (публікація [51]) дослідженою була дуже мала частина транзйентного «радіонеба». В той час, коли транзйентні сигнали чудово досліджувалися в найбільш високочастотній частині електромагнітного спектру за допомогою рентгенівських і гамма-супутників, пошуки в радіодіапазоні були обмежені малою площею покриття неба та

високою вразливістю існуючих телескопів до радіочастотних завад (Radio Frequency Interference – RFI). Для розширення можливостей пошуків одиночних імпульсів, необхідні системи з багатьма променями або антенами, тому що потрібно проводити тести на співпадіння, які дозволять розрізняти імпульси космічного та земного походження. Радіотелескопи з більшими полями зору є необхідними для максимізації шансів на детектування радіоспалахуючих об'єктів і для доповнення пошуків на високих частотах. Більші збираючі площі можуть підвищити чутливість до імпульсів пульсарів і транзієнтних джерел в інших галактиках. Спостереження за допомогою багатьох променів дозволить відрізняти космічні сигнали від RFI. У майбутньому будуть створені великі радіотелескопи, такі як SKA. Завдяки запланованому полю зору в 100 разів більшому та чутливості у 20 разів вищій, ніж в Arecibo, SKA, за словами авторів, здійснить революцію в дослідженні транзієнтів у радіодіапазоні. Оскільки SKA почне працювати ще через багато років, то пошуки одиночних імпульсів у той самий час (особливо, за допомогою багатьох променів) є важливими та потрібними для усунення завад і обробки великих обсягів спостережних даних. Із більш чутливими інструментами та більш тонким аналізом, наступні десятиліття, безперечно, забезпечать значно краще розуміння природи радіоспалахуючих об'єктів, включаючи крабоподібні пульсари в інших галактиках – невід'ємну частину високоенергетичних спалахуючих джерел, та інші класи об'єктів, які ще будуть відкриті.

Для з'ясування того, як досягти максимально можливої кількості відкриттів пульсарів за допомогою першої фази SKA (SKA1), автори [9] провели велику кількість моделювань, що враховують всі потенційно доступні ресурси. Моделювання розглядали лише SKA1-LOW (50 ÷ 350 МГц) і SKA1-MID (350 МГц – кілька ГГц). Було також виявлено, що при ширині смуги 100 МГц, оптимальна центральна частота для пошуку пульсарів на SKA1-LOW складає 250 МГц. Це значення є компромісним між спектральним індексом пульсарів, температурою неба й ефективною

збираючою площею дипольних антен. Численні моделювання були проведені для оглядів всього неба за допомогою SKA1-LOW і SKA1-MID, припускаючи фіксований час накопичення – 600 с за наведення, як описано в базовій конструкції. Вони показують, що SKA1-MID зможе продетектувати 9000 звичайних пульсарів і близько 1400 – мілісекундних, а SKA1-LOW – 7000 та 900 пульсарів, відповідно. Розподіл цих пульсарів за DM наведений на рис. 3.1. На перший погляд, SKA1-LOW здається менш конкурентоздатним, проте слід пам'ятати, що він «бачить» меншу частину неба і якщо подивитися на кількість відкритих пульсарів як функцію міри дисперсії, то виявиться, що SKA1-LOW зможе знайти більшу їх кількість на низьких DM. Це ясно показує, що нижчі частоти, на яких працює SKA1-LOW, викликають розмивання та розсіяння в міжзоряному середовищі уздовж променя зору через площину Галактики, що зменшує кількість детектованих там джерел. Проте неперевершена збираюча площа SKA1-LOW робить його здатним знайти більше близьких пульсарів.

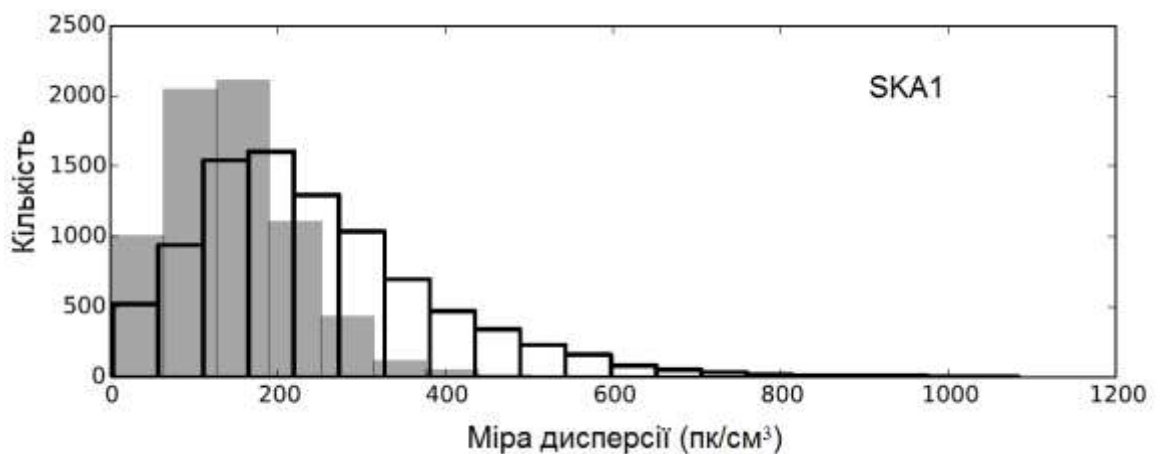


Рис. 3.1. Гістограми, що показують продуктивність пошуку пульсарів телескопів LOW і MID в обох фазах SKA. У фазі 1 SKA видно, наскільки LOW (темні прямокутники) краще працює на низьких DM завдяки більшій ефективній площі, проте MID (прозорі прямокутники) досягає більших глибин Галактики [9].

У [52] автори аналізують довго- та короткоперіодичні часові залежності часів прибуття імпульсів і частоту детектування імпульсів восьми RRAT із Багатопроменевого огляду пульсарів на радіотелескопі Паркс (PMPS). Були виявлені періодичності в часах прибуття індивідуальних імпульсів від шести RRAT. Ці періодичності лежать у межах від ≈ 30 хв до 2100 днів і для кожного радіотранзєнта були знайдені від 1 до 16 незалежних (гармонійно не пов'язаних) періодичностей. Крім цього, автори встановили, що випромінювання імпульсу – це випадковий процес на коротких (годинних) часових масштабах, проте більшість цих об'єктів демонструють більш довготермінову (місяці-роки) не випадкову поведінку. Більшість RRAT випромінюють одиночні імпульси, але деякі демонструють ознаки їх групування (наприклад, PSR J1819–1458 і J1317–5759 випромінюють більше «дуплетів» (два) і «триплетів» (три послідовні імпульси), ніж це очікується в їх випадкових розподілах). В інших радіотранзєнтів такого перевищення знайдено не було. Є декілька різних моделей випромінювання RRAT, що залежать як від зовнішніх, так і від внутрішніх факторів, які сумісні з цими властивостями. До них можна віднести наявність довколазорної речовини, нерадіальні коливання чи якийсь інший процес. Радіоспостереження на більших часових масштабах і на інших частотах повинні допомогти зрозуміти природу радіотранзєнтів, що обертаються.

Автори [53] описують спостереження RRAT, які були відкриті при повторній обробці даних PMPS. Спостереження велися досить довгий час для того, щоб отримати точні часи приходу імпульсів семи нових джерел, їх загальна кількість, відома на момент публікації, стала рівною 14. Крім того, анонсується відкриття 7 нових транзєнтних джерел, одне з яких, ймовірно, позагалактичне ($z \approx 0.1$) та може бути другим прикладом так званого «Lorimer burst» (FRB). Відомі часи приходів імпульсів дозволяють оцінити такі характеристики зорі, як темп втрати енергії, напруженість магнітного поля та часові шкали еволюції, а також спрощують подальші спостереження в інших частотних діапазонах, за рахунок надання точних астрометричних

даних. Все це дає змогу поставити питання про те, чи є RRAT окремим населенням нейтронних зір, як було запропоновано раніше? Пошуки одиночних імпульсів можуть значно вплинути на детектування пульсарів, які складно чи неможливо виявити іншими способами, зокрема пульсари з великими періодами (половина RRAT із PMPS мають періоди більше 4 с), сильними магнітними полями ($B \geq 10^{13}$ Гс) та пульсари, що наближаються до «долини смерті» на діаграмі «Період – Похідна періоду» (рис. 3.2). Ця діаграма часто використовується для опису еволюції нейтронних зір. У процесі свого життя, пульсар рухається в нижню праву частину на цій діаграмі та, врешті-решт, перетинає «лінію смерті». Детальні параметри нуллінгу таких пульсарів невідомі, проте є докази наявності широкого розмаїття типів «поведінки» серед населення пульсарів.

Результати пошуку транзйєнтних радіоспалахів, тривалістю від 0.125 до 32 мс, у двох архівних оглядах пульсарів середніх галактичних широт ($5^\circ < |b| < 30^\circ$) за допомогою багатопроменевого приймача Паркса, представлені у [54]. Ширина частотної смуги складала 288 МГц, центральна частота – 1372.5 МГц. Було відкрито 14 нових нейтронних зір, сім із яких відносяться до класу «RRAT». У 12 із цих 14 НЗ періоди лежать у межах від 0.2 до 6.2 с. Автори описують методологію пошуку й обговорюють нові детектування з метою з'ясувати, яке відношення населення RRAT-ів має до загального населення пульсарів. Нові детектування показують: 1) що розподіл RRAT у просторі з оглядів дуже нагадує розподіл пульсарів (для об'єктів, що розташовані на відстані до 0.86 кпк від площини Галактики); 2) де можна було виміряти – було виявлено, що ширина імпульсів RRAT схожа на ширину індивідуальних імпульсів пульсарів із близьким періодом, що свідчить про подібний розмір конусу випромінювання; 3) нові детектування з даної роботи охоплюють різні нуллінгові частини, тому автори стверджують, що RRAT просто можуть бути пульсарами із нуллінгом («замовканням»), які «вмикаються» на час, менший за період імпульсу. Зрештою, нещодавно відкритий PSRJ0941-39 може демонструвати зв'язок

між пульсарами та радіотранзієнтами, що обертаються. Цей дивний об'єкт був відкритий як RRAT, але в подальших спостереженнях проявив себе як яскравий (10 мЯн) пульсар із малим часом нулінгу. Тому, на думку авторів,

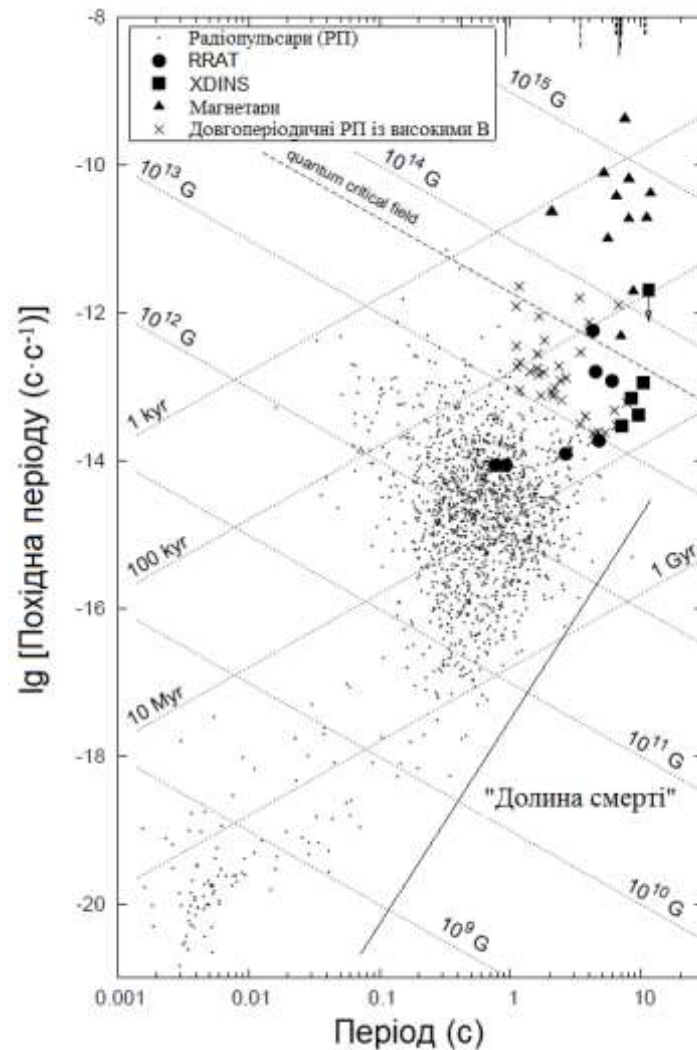


Рис. 3.2. Діаграма «Період – Похідна періоду» ($P - P'$). Звичайні пульсари формують скупчення у правій частині діаграми. Мілісекундні пульсари (МСП) концентруються в нижньому лівому кутку. Пунктирні лінії показують вік і магнітні поля різних НЗ [34].

очевидно, що нейтронна зоря може коливатися між станом пульсару та RRAT. Головне, що місцезнаходження імпульсів RRAT збігаються з випромінюванням пульсарів, що свідчить про зв'язок між цими двома

механізмами випромінювання та що RRAT – це не просто пульсари, які спостерігаються по-різному орієнтованими.

Автори [55] вважають RRAT окремим класом пульсарів, що характеризуються спорадичними спалахами радіовипромінювання. Спорадичність випромінювання робить їх складними для детектування за допомогою стандартних алгоритмів пошуку пульсарів, які працюють за рахунок періодичності сигналів. Дослідники використовували створені алгоритми пост-обробки для автоматичної ідентифікації яскравих одиночних астрофізичних сигналів (таких, як імпульси RRAT) і це дозволило їм відкрити 33 нових кандидати у RRAT серед даних Скануючого огляду на телескопі Green Bank (350 МГц). Були проведені подальші спостереження 7 об'єктів, 6 із них вже були підтверджені. Слід зазначити, що кількість знайдених RRAT-кандидатів близька до кількості знайдених у цьому огляді пульсарів (34). У роботі також описані алгоритми обробки та показані найсвіжіші результати аналізу даних кандидатів.

У [56] описаний пошук транзієнтних та змінних радіоджерел на 154 МГц (ширина смуги – 30.72 МГц) за допомогою 32-плиточного прототипу Murchison Widefield Array. Радіотранзієнти виявлені не були, проте була встановлена верхня межа поверхневої щільності джерел на рівні $\rho < 7.5 \times 10^{-5}$ град⁻² зі щільностями потоків > 5.5 Ян та характерними часовими шкалами 26 хв і 1 рік.

Огляд транзієнтів і змінних джерел на часових шкалах від 28 с до ~1 року, із використанням Murchison Widefield Array на 182 МГц, представлений у [57]. Вище порогу детектування (0.285 Ян) кандидати в транзієнти виявлені не були, що встановило межу на поверхневу щільність транзієнтів $\rho < 4.1 \times 10^{-7}$ град⁻² для найменшої з розглянутих шкал часу. Також був проведений первинний огляд змінності джерел у полі зору зі щільностями потоків ≥ 0.5 Ян і не було виявлено жодного джерела зі значною змінністю світності.

В роботі [58] був відкритий 21 радіотранзйєнт, що обертається, у даних Скануючого пульсарного огляду на телескопі Green Bank (GBT, 350 МГц) та пульсарного огляду North Celestial Cap на цьому ж телескопі за допомогою нового алгоритму для «просіювання» кандидатів. Автори зазначають, що RRAT – це пульсари зі спорадичним випромінюванням, які легше детектуються завдяки своїм яскравим індивідуальним імпульсам, ніж за допомогою Фур’є-алгоритмів для пошуку періодичностей. Була розроблена програма RRATtrap – алгоритм для «просіювання» одиночних імпульсів, який може бути інтегрований до конвеєрів обробки даних огляду пульсарів, із метою виявлення RRAT і швидких радіосплесків (FRB). Були проведені подальші спостереження нещодавно виявлених авторами джерел на кількох радіочастотах за допомогою GBT і LOFAR. В результаті були отримані уточнені положення та значення їх періодів, мір дисперсії та частоти спалахів, а також фазово-когерентні часи приходу імпульсів для чотирьох із них. Нові радіотранзйєнти мають міри дисперсії в межах від 15 до 97 пк/см³, періоди від 240 мс до 3.4 с і оціночні частоти спалахів від 20 до 400 на годину (на 350 МГц). Автори використали цю нову вибірку RRAT для проведення статистичних порівнянь RRAT і класичних пульсарів для того, щоб пролити світло на зв’язок між цими двома населеннями НЗ. Було виявлено, що просторовий розподіл і розподіл мір дисперсії радіотранзйєнтів узгоджується з аналогічними розподілами для пульсарів, що були знайдені в межах того самого огляду. Розподіл же періодів знайдених RRAT значно відрізняється від аналогічного розподілу звичайних пульсарів. Але ця відмінність у класифікації може бути значною мірою штучною. Наприклад, нейтронні зорі з малими періодами, що випромінюють досить рідко, дослідники схильні відносити до пульсарів із екстремальним нуллінгом, а не до RRAT. Також було показано, що розподіли частот спалахів RRAT можуть вплинути на їх класифікацію як джерел спорадичного чи періодичного випромінювання та, таким чином, впливати на їх відкриття під час проведення оглядів. Слід зазначити, що хоча й був отриманий певний

розподіл частот спалахів, проте основний розподіл лишається невідомим. Дослідження RRAT, що випромінюють дуже рідко, не дають можливості надійно встановити період, а отже й те, чи дане джерело є радіотранзієнтом, що обертається (RRAT), чи джерелом транзієнтного випромінювання іншої природи. Саме тому ця популяція є малодослідженою. Проте зростаюче розмаїття таких властивостей, як шкали інтермітентності транзієнтів, почало натякати на континуумну поведінку, що підтверджує гіпотезу про зв'язок між RRAT і пульсарами з нуллінгом і може бути просто граничним випадком останніх. Були знайдені докази, що ймовірність випромінювання повільнішими пульсарами (тобто з $P > 200$ мс) яскравих одиночних імпульсів є вищою, ніж така ймовірність для більш швидких ($P < 200$ мс), хоча це попередній висновок. Результати, отримані авторами, узгоджуються з запропонованим зв'язком між RRAT, транзієнтними пульсарами та класичними пульсарами як джерелами в різних частинах спектру активності імпульсу.

Сліпий пошук низькочастотних радіотранзієнтів за допомогою порівняння оглядів GLEAM (200 МГц) та TGSSADR1 (147.5 МГц) наведений у [65]. Були знайдені три кандидати у транзієнтні джерела, проте подальший аналіз показав, що два з них – це артефакти зображень. Тому був представлений один кандидат: TGSSADRJ183304-384046, що має щільність потоку 304 мЯн на частоті 147.5 МГц. Даний об'єкт не був продетектований в огляді GLEAM 3 роки по тому, тому припускається, що він опустився нижче 41 мЯн. Також це джерело не було продетектоване в інших архівних радіоданих, як і в подальших спостереженнях авторів. Грунтуючись на цьому детектуванні, в роботі зроблена оцінка поверхневої щільності – $\rho = 6.2 \cdot 10^{-5} / \text{град}^2$ для низькочастотних радіотранзієнтів на часових масштабах від 1 до 3 років.

В даний час будуються низькочастотні радіотелескопи. Один із них – Long Wavelength Array (LWA). У роботі [59] автори представляють результати спостережень на першій станції LongWavelengthArray (LWA1) і

отримані первинні наукові результати. Презентовано детектування періодичного випромінювання 44 раніше відомих пульсарів (показані профілі 44 пульсарів, деякі з них мають значну еволюцію уздовж частот LWA1), включаючи три МСП (на частотах 40–88 МГц). Були проведені точні вимірювання DM 44 пульсарів (значення якої, здебільшого, дуже близькі до отриманих на УТР-2 у роботі [60]), середньої щільності потоку 36 та спектральних індексів 27 пульсарів у вищезгаданому частотному діапазоні (табл. 3.1). Показано, що вплив міжзоряного середовища підвищується на низьких частотах, на яких працює LWA (10–88 МГц), що робить його дуже чутливим інструментом для вимірювання варіацій DM та інших ефектів МЗС. Як і очікувалося, вимірювання потоків підтвердили спектральний заворот у пульсарів, які спостерігалися. Вимірювання DM і її порівняння з раніше отриманими значеннями показали, що даний параметр значно змінився з моменту першого детектування й ці зміни можна легко спостерігати за допомогою LWA1. Дані вимірювання були зроблені з точністю порядку 10^{-5} пк/см³ в деяких пульсарів.

Дуже важливо підкреслити, що дані LWA1 більш близькі до даних УТР-2, а не до ATNF (табл. 3.1.). Це свідчить про більш високу точність вимірювань на низьких частотах по відношенню до високих (де отримана більшість даних ATNF), а також про те, що буде достатньо легко відділити сигнали відомих пульсарів, які вже детектувались на УТР-2, від нових транзієнтів. Навіть якщо різниця буде порядку однієї тисячної (!) від міри дисперсії, широкосмугові низькочастотні спостереження дають змогу однозначно виявити цю різницю.

Крім того, автори представили Архів Даних Пульсарів, де зберігається частина спостережних даних, отриманих на LWA1.

У [62] представлені результати спостережень 19 RRAT за допомогою LWA1 (на частотах 30–88 МГц). Джерела, що спостерігалися, були відкриті під час більш високочастотних оглядів пульсарів. Із 19 обраних для спостережень RRAT, були продетектовані 2 радіотранзієнти. Наведені

вимірювання їх DM, періодів, профілів імпульсів, щільностей потоку, а також порівняння отриманих параметрів із попередніми, більш високочастотними вимірюваннями.

Таблиця 3.1. Міри дисперсії 44 пульсарів, продетектованих на LWA1 [59]. Також наведені значення з каталогу ATNF [61] і значення з роботи [60], виконаної на УТР-2.

Pulsar	P s	DM _{ATNF} pc cm ⁻³	DM _{ATNF} Epoch	DM _{LWA1} pc cm ⁻³	DM _{LWA1} Epoch	DM _{UTR2} pc cm ⁻³	DM _{UTR2} Epoch
J0030+0451	0.0049	4.333(1)	50984	4.33252(4)	56560		
B0031-07	0.9430	11.38(8)	46635	10.922(6)	56843	10.896(4)	55480
J0034-0534	0.0019	13.76517(4)	50690	13.76505(4)	56631		
B0138+59	1.2229	34.797(11)	49293	34.926(4)	56563		
B0149-16	0.8327	11.922(4)	48227	11.92577(4)	56955		
B0301+19	1.3876	15.737(9)	49289	15.68(3)	57035		
B0320+39	3.0321	26.01(3)	49290	26.173(2)	56563	26.162(11)	55480
B0329+54	0.7145	26.7641(1)	46473	26.779(1)	56364	25.661(11)	55480
B0355+54	0.1564	57.1420(3)	49616	57.1453(8)	56674		
B0450+55	0.3407	14.495(7)	49910	14.5943(9)	56564	14.602(5)	55480
B0525+21	3.7455	50.937(17)	54200	50.93(1)	56565		
B0628-28	1.2444	34.468(17)	46603	34.425(1)	56706		
B0655+64	0.1957	8.771(5)	48806	8.777(1)	56639		
B0809+74	1.2922	5.733(1)	49162	5.771(2)	56285	5.755(3)	55480
B0818-13	1.2381	40.938(3)	48904	40.981(2)	56568		
B0823+26	0.5307	19.454(4)	46450	19.4789(2)	56665	19.484(6)	55480
B0834+06	1.2738	12.889(6)	48721	12.8640(4)	56864	12.872(4)	55480
B0906-17	0.4016	15.888(3)	48737	15.879(2)	56980		
B0919+06	0.4306	27.271(6)	55140	27.2986(5)	56285	27.316(6)	55480
B0943+10	1.0977	15.4(5)	48483	15.334(1)	56365	15.339(4)	55480
B0950+08	0.2531	2.958(3)	46375	2.96927(8)	56285	2.972(2)	55480
B1112+50	1.6564	9.195(8)	49334	9.1830(4)	56687	9.185(4)	55480
B1133+16	1.1879	4.8451(1)	46407	4.8480(2)	56743	4.846(2)	55480

Був виявлений доволі низький рівень детектування (11%), який може бути комбінацією низької чутливості LWA1 (порівняно з більш високочастотними телескопами), розсіянням у МЗС або спектральним заворотом. Профілі імпульсів із LWA1 дуже схожі на отримані на вищих частотах. Робота також показала, що ці джерела є значно яскравішими на низьких частотах, ніж на високих. Обидва продетектовані RRAT мають міру дисперсії менше 20 пк/см³, в той час, як 14 із 19 радіотранзієнтів, які спостерігалися, але не були виявлені, мають DM більшу за 20 пк/см³. Це підтверджує припущення про те, що розширення імпульсів за рахунок

розсіяння є важливим стримуючим фактором при спостереженнях на низьких частотах.

Оскільки метою даної роботи є пошук транзієнтних сигналів, то для її досягнення була обрана модель пошуку імпульсів RRAT і саме ґрунтуючись на критеріях і методах для їх відбору та виявлення, мав бути створений комплекс програм для пошуку індивідуальних сигналів у даних огляду Північного неба з метою пошуку джерел спорадичного радіовипромінювання декаметрових хвиль. Такий комплекс програм був створений і отримав назву «короткий конвеєр».

«Короткий конвеєр» – це набір процедур обробки й аналізу окремих подій із можливістю інтерактивного внесення змін до параметрів обробки на всіх її етапах [109–113]. У результаті була отримана можливість одночасного відображення кількох взаємозалежностей параметрів сигналу (наприклад, час – частота, час – міра дисперсії, міра дисперсії – співвідношення «Сигнал/Шум» та ін.) та перевірки на відповідність кожного індивідуального імпульсу вищезгаданим критеріям за максимальною кількістю параметрів. І це, у свою чергу, дозволило відсіяти величезну кількість завад, які не могли бути ідентифіковані попередніми процедурами обробки.

Обробка кожної окремої події, що аналізується, потребує 2 послідовних файлів даних (~ 1040 с), оскільки дисперсійна затримка при $DM = 30$ пк/см³ між частотами 33 і 16.5 МГц становить близько 400 с і починатися вона може аж наприкінці першого файлу. На екран же для аналізу виводиться 520-секундний інтервал (довжина одного файлу), який починається приблизно за секунду до часу появи імпульсу на частоті 33 МГц.

На рис. 3.3 показаний рядок інтерактивно налаштовуваних параметрів, включаючи максимум інтенсивності сигналу відносно СКВ шуму в частині запису, де немає імпульсу, що аналізується.

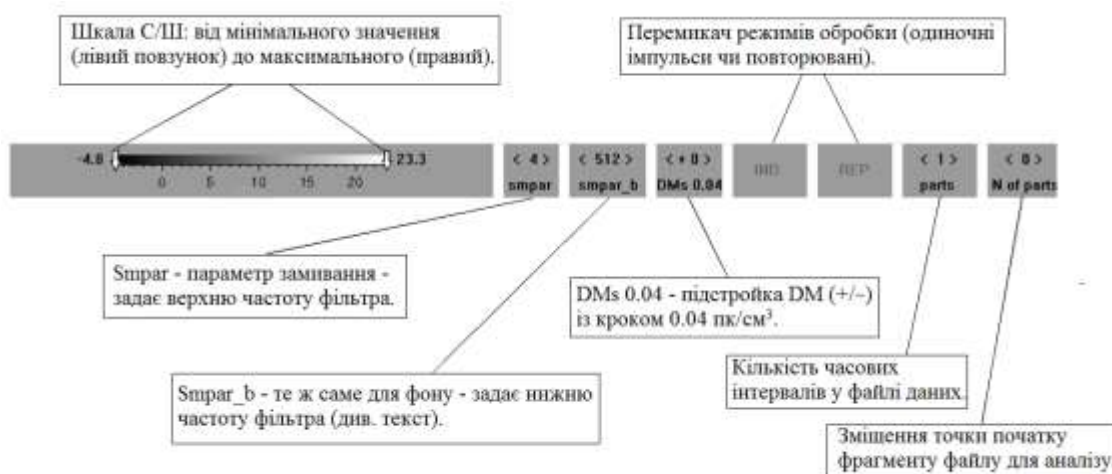


Рис. 3.3. Рядок інтерактивно налаштовуваних параметрів: максимум і мінімум С/Ш, параметри згладжування імпульсів і фону (smprag та smprag_b, відповідно), DM, режим (індивідуальні імпульси чи повторювані) і вибір частини файлу для аналізу [109].

Нижче рядка параметрів відображаються 16 смуг (рис. 3.4). Кожна з 16 сусідніх смуг є фрагментом кадру «Час – Міра дисперсії» всіх шістнадцяти 32-секундних кадрів. Але у вікні представлено тільки вузький діапазон значень мір дисперсії (довкола прицільної), яка характеризує подію, що обробляється.

Найбільш важливим настроюваним параметром є значення DM із кроком варіювання 0.002 пк/см^3 (що в 5 разів менше, ніж той крок, який використовувався в «довгому конвеєрі»). Підстройка значення міри дисперсії, коли імпульс на спектрограмі розташовується строго вертикально, є дуже важливою як для відсіювання сигналів, що мають частотно-часові залежності, відмінні від f^{-2} , так і для визначення інтенсивності та тривалості імпульсу. Також важливо розташувати сигнал по центру підсвіченого вікна спектрограми (що буде показано нижче).

Крім того, програма дозволяє аналізувати індивідуальні чи повторювані імпульси. Це виявилось важливим для пошуку завад у певній частині або в усьому файлі. Параметр «parts» (що дорівнює 1, 1/2, 1/4, 1/8 чи 1/16 файлу) вказує, у якій частині файлу проводити пошук повторюваних

сигналів, а «N of parts» – з якої із 16 частин файлу починати цей аналіз (0 – перша смуга).

Повзунки на шкалі інтенсивності, нормованій на СКВ, дозволяють змінювати контрастність на двовимірному та тривимірному представленні інтенсивності в залежності від часу та міри дисперсії (рис. 3.4).

Параметр згладжування (smprg, див. рис. 3.3) є, по суті, фільтром, який придушує верхні частоти. Його використання дозволяє максимізувати співвідношення сигнал/шум за допомогою підбору довжини інтервалу, що усереднюється. Результат застосування параметру smprg показаний у «збільшувальному склі» – «зумі» на рис. 3.5.

З іншого боку, для підвищення контрасту коротких транзійтних сигналів за умови великих варіацій фону, які іноді трапляються при іоносферних мерехтіннях радіовипромінювання близьких континуальних джерел, використовується фільтр, що відрізає нижні частоти – повільні варіації фону (що налаштовується за допомогою параметру smprg_b, тобто параметром замивання фону). Параметр вирівнювання іноді допомагає підвищити С/Ш, але при його дуже малих значеннях можна зіткнутися з небажаним наслідком – центруванням даних (відносно фону), оскільки відрізаються все більш низькочастотні гармоніки (рис. 3.6).

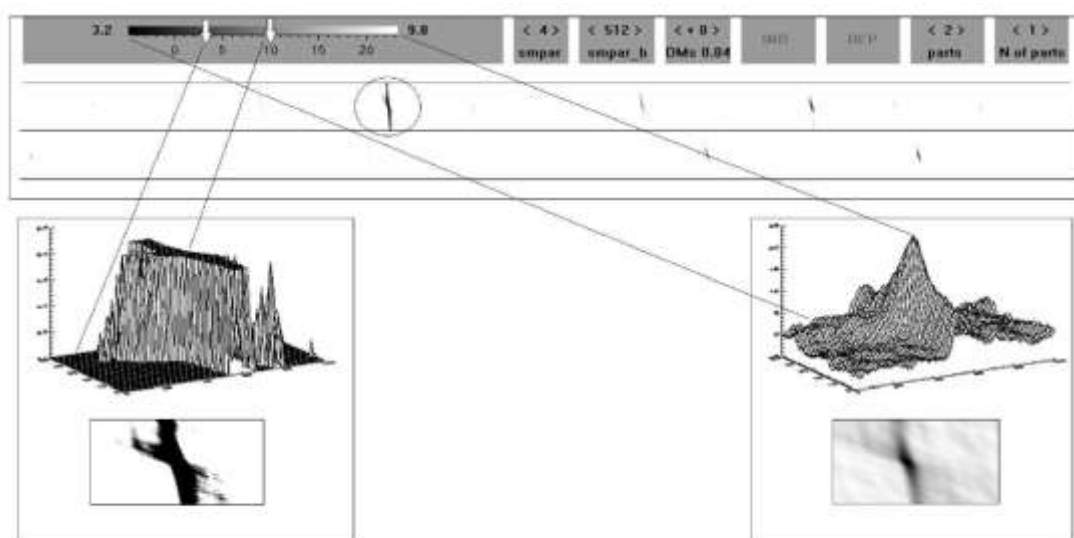


Рис. 3.4. Налаштування рівнів обрізання С/Ш. На малюнку показано

встановлення нового максимального та мінімального значення С/Ш і переоброблені дані [109].

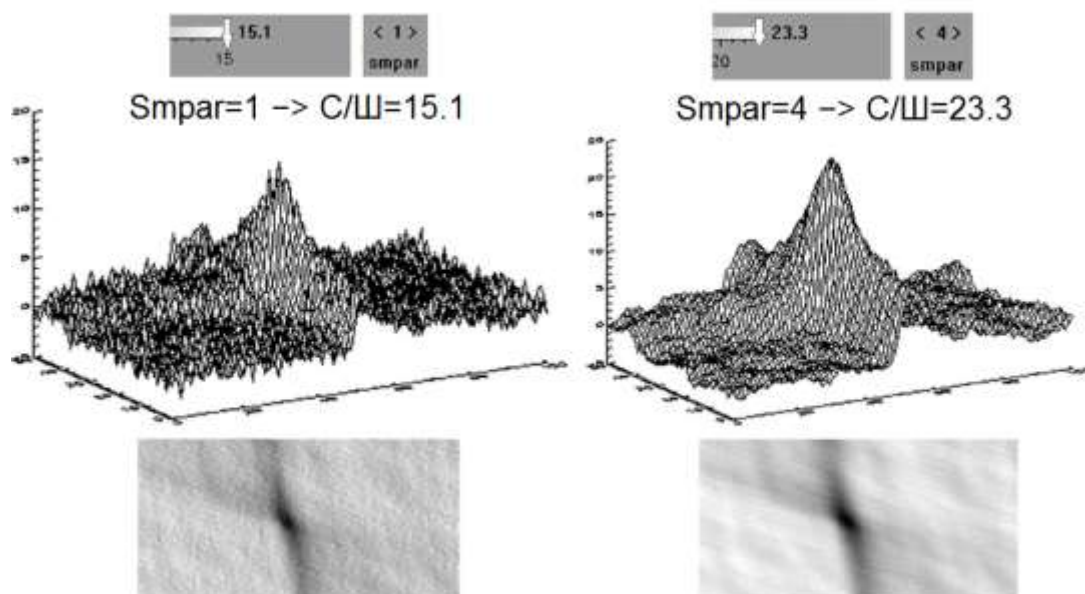


Рис. 3.5. Налаштування рівня обрізання низькочастотного фільтра (застосування параметра «smpar») [109].

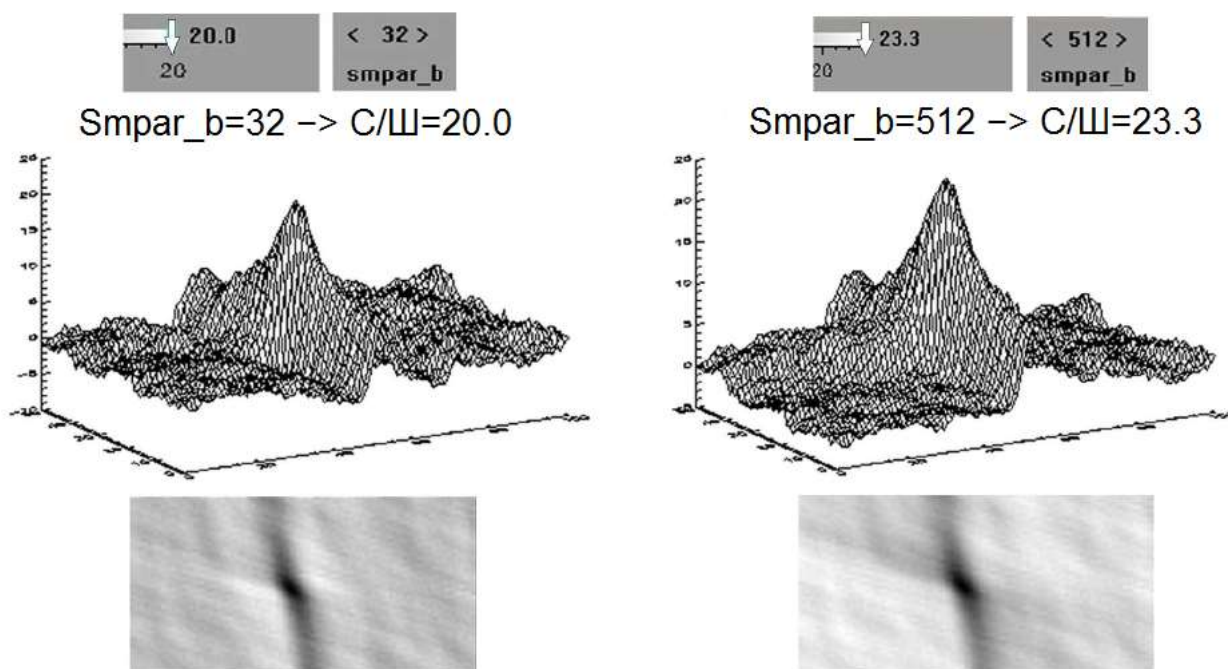


Рис. 3.6. Результат застосування параметра «smpar_b», який обрізає низькочастотні компоненти (повільні варіації фону) [109].

Після вибору події (імпульсу), що аналізується (у головному вікні на рис. 3.2 імпульс обведений овалом і показаний у «зумі»), час появи якої взято з даних попереднього аналізу, програма дає змогу проаналізувати спектрограму цього імпульсу (динамічний спектр, рис. 3.7, права верхня панель). Зліва від неї можна побачити накопичений за 160 мс спектр (дані, що розташовані в підсвіченій вертикальній області на спектрограмі). Кількість субсмуг (4...256) можна змінювати за допомогою опцій «Narg» і «Wide». За допомогою підстройки цього параметра можна збільшити чутливість у частотних смугах, де існує сигнал. Як вже зазначалося раніше, імпульси пульсарів [30] дуже рідко займають суцільну смугу 10 МГц і більше. Зазвичай імпульс займає 3–5 МГц або складається з кількох таких «уривків» зі значними частинами спектру, що не містять імпульсного випромінювання. І чим більша міра дисперсії, тим більш вузькими можуть бути відрізки імпульсного випромінювання. Подібно випромінюванню відомих пульсарів виглядає і невідомий транзієнт із мірою дисперсії 3.676 пк/см^3 на рис. 3.7.

Нижня права панель цього рисунку розбита на п'ять частин із графіками залежності інтенсивності від часу: усереднений вигляд імпульсу в усій смузі частот і чотирьох субсмугах (по 4.125 МГц кожна).

Ліва нижня панель рис. 3.7 показує спектрограму імпульсу до операції дедиспергування від верхніх до нижніх частот. Оскільки характерна тривалість сигналів не перевищує кількох десятих секунди, а затримка нижніх частот відносно верхніх вимірюється сотнями секунд, то імпульс на недиспергованій спектрограмі зазвичай займає ширину 1-2 пікселі. Тільки найпотужніші сигнали можуть бути видимими на нижній лівій панелі.

Як було згадано вище, здатність «короткого конвеєра» обробляти також і повторювані імпульси важлива для виявлення деяких типів радіочастотних завад. Існує помітна кількість завад штучного походження, інтенсивність яких змінюється в широкому інтервалі. При дедиспергуванні (а отже, закономірній зміні затримки між різними частотними каналами для

3000 різних значень міри дисперсії) незалежні сплески інтенсивності в деяких частотних каналах можуть випадково співпадати. Це призводить до зростання інтенсивності на площині «Час – Міра дисперсії» до та вище порогу детектування. Аналіз таких подій не демонструє наявності характерного овалу біля максимуму. Але якщо завада є повторюваною, то її можливо ідентифікувати за допомогою аналізу періодичностей. При аналізі повторюваного випромінювання можна проаналізувати його спектр і деякі інші характеристики.

Максимізація С/Ш і в цьому випадку починається зі зміни параметрів ковзаючого вікна з усередненням сигналу (smpar) і фону (smpar_b) та обиранням частини файлу, де сигнал є максимальним. Це може допомогти підвищити С/Ш послідовності імпульсів і побачити гармоніки більш чітко (рис. 3.8). Для контрасту на рис. 3.9 показано аналіз частини файлу, в якій немає помітного імпульсного випромінювання.

Подальше збільшення співвідношення С/Ш може бути досягнуте при обмеженні сигналу за інтенсивністю як згори, так і знизу.

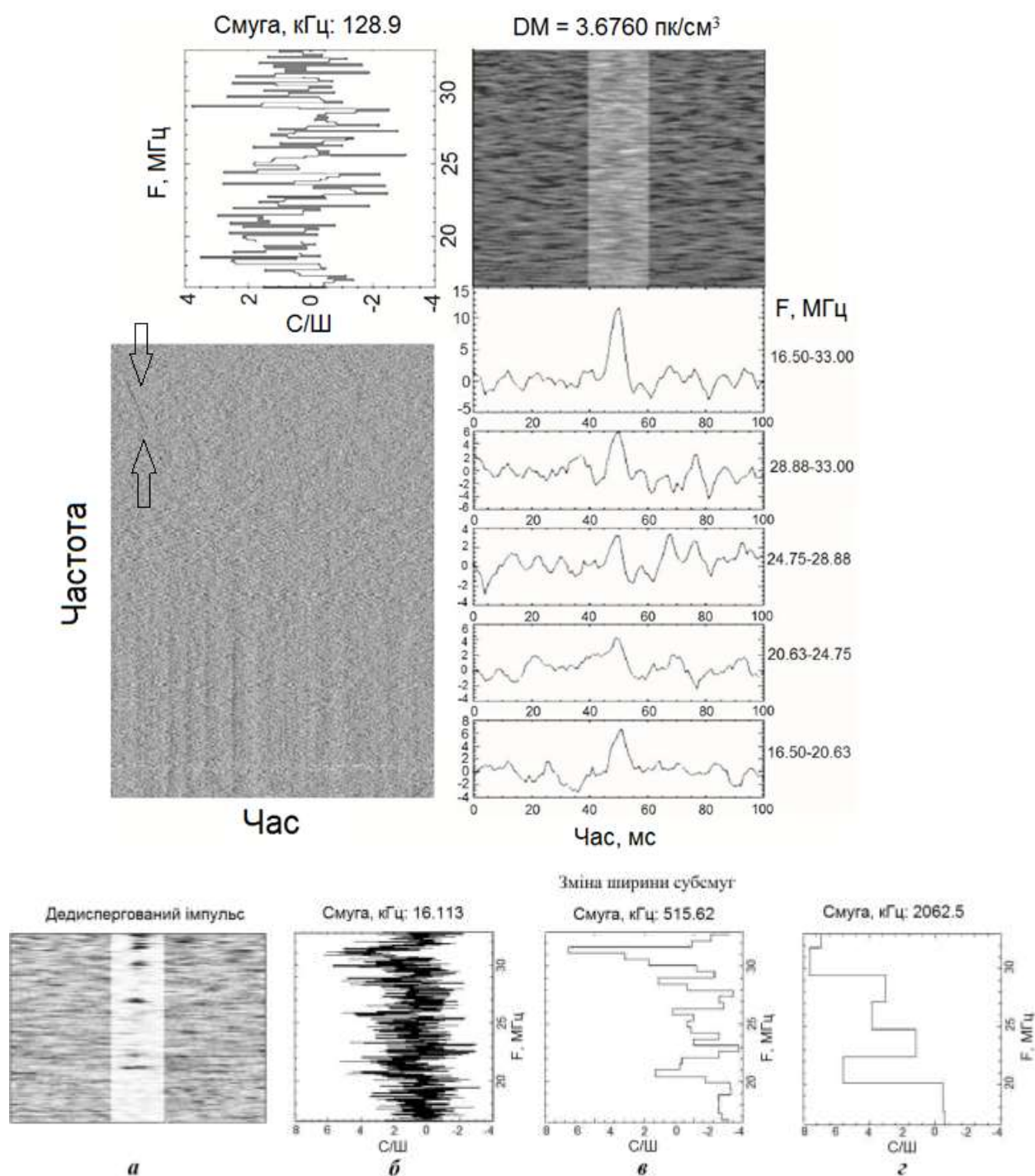


Рис. 3.7. Верхня панель: аналіз індивідуальних імпульсів. Інтерфейс включає такі панелі: диспергований імпульс, накопичений за часом спектр дедиспергованого імпульсу та сумування за частотами. Нижня панель: дедиспергована спектрограма імпульсу (а) та зміна ширини частотної субсмуги: б) 16 кГц; в) 516 кГц; г) 2062 кГц [109].

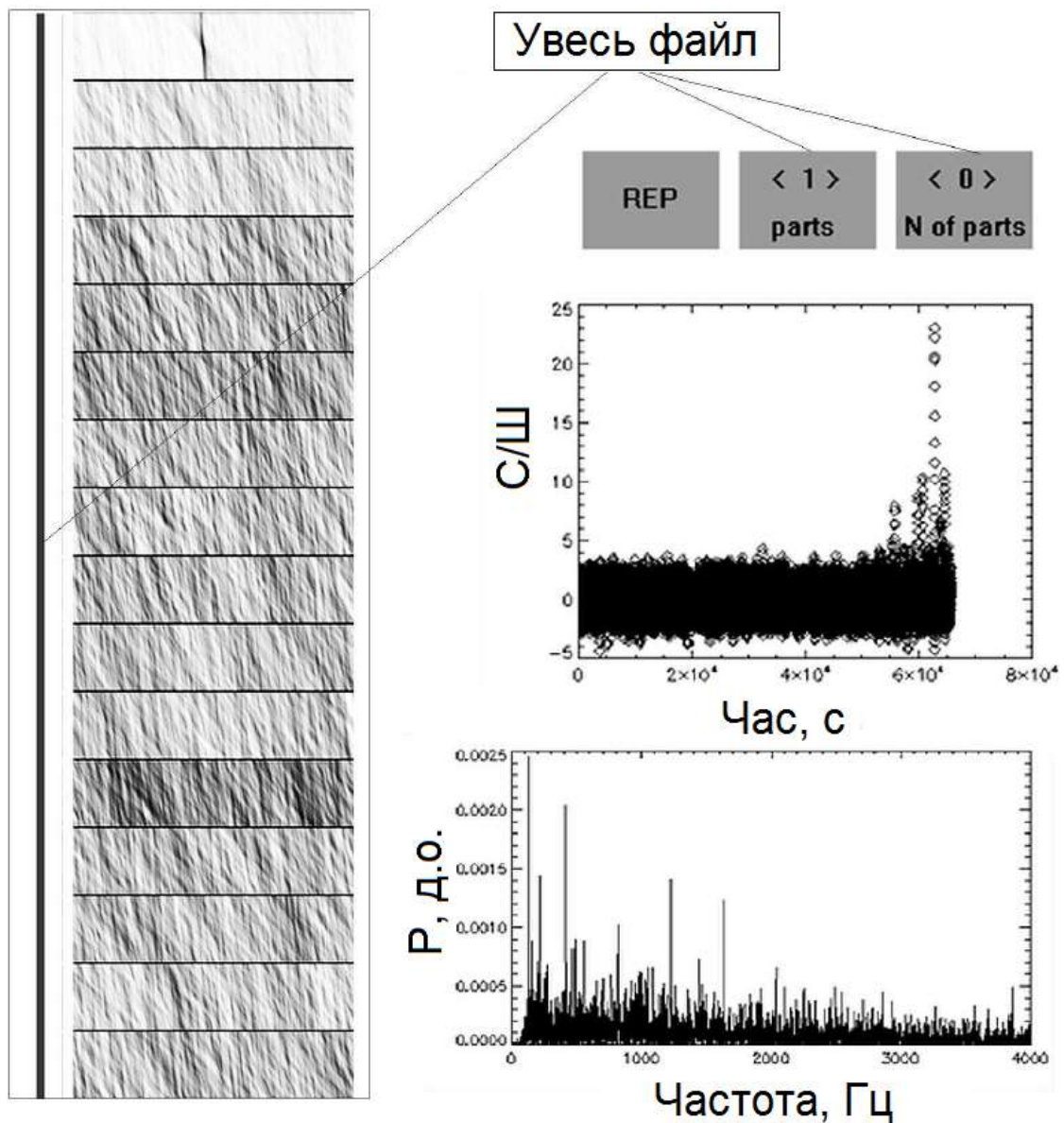


Рис. 3.8. Аналіз повторюваних імпульсів. Панелі показують часову послідовність і її FFT, ілюструючи максимальні викиди та гармоніки імпульсів [109].

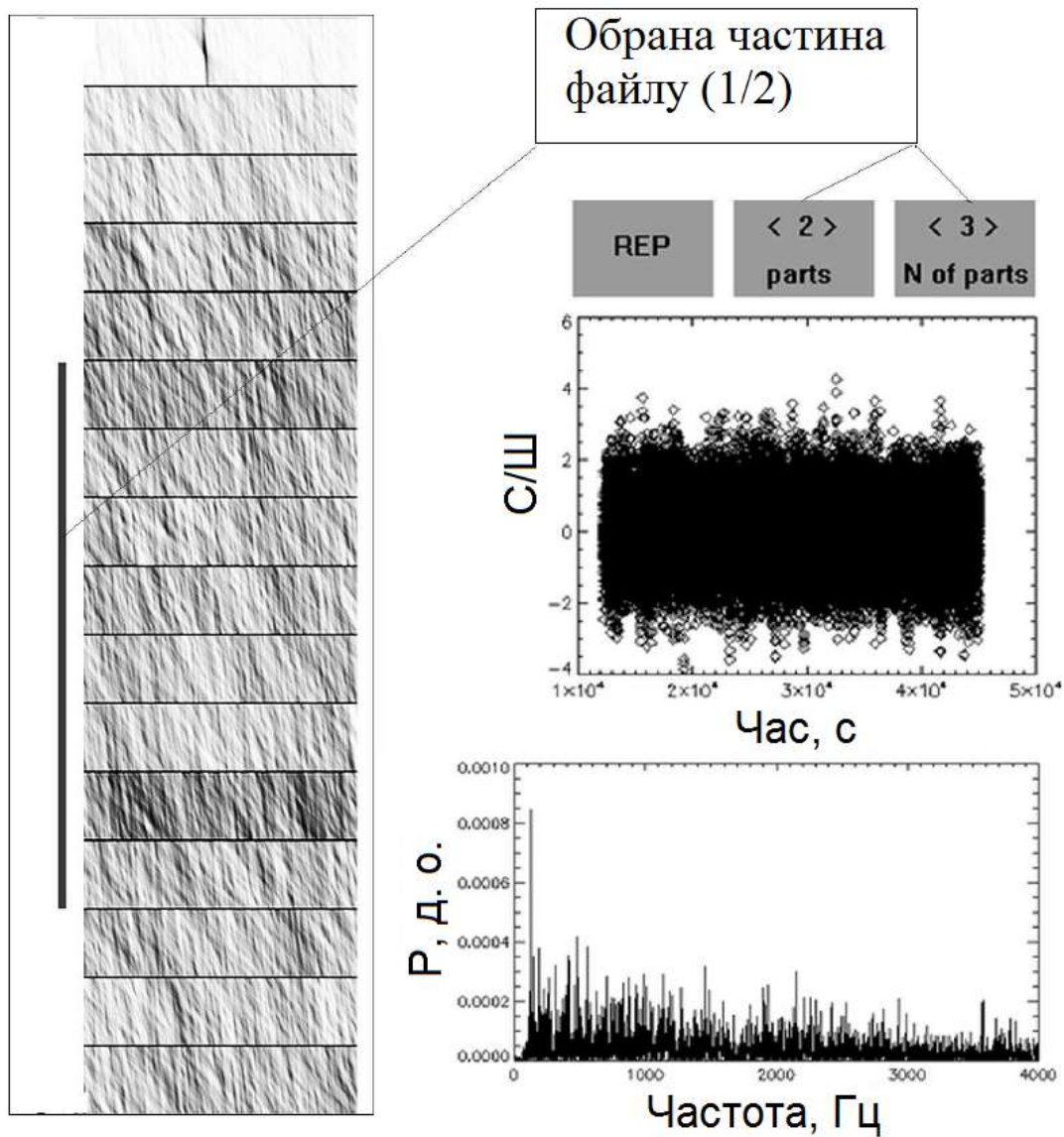


Рис. 3.9. Перераховані панелі С/Ш та FFT обраної частини файлу [109].

На рис. 3.10 показаний приклад транзієнта в порівнянні з імпульсом відомого пульсару B1508+55, а на рис. 3.11 показані ще декілька транзієнтних сигналів, що відповідають критеріям космічної природи. Настроювання параметрів фільтрів і співпадіння значення DM однозначно вказує на імпульс відомого пульсара з точністю $0.004\text{--}0.006 \text{ пк/см}^3$. Тут треба ще раз підкреслити, що низька центральна частота діапазону 25 МГц і широка відносна смуга, що рівна октаві ($33/16.5 = 2$), забезпечує недосяжну для інших частотних діапазонів точність вимірювання значення міри дисперсії для одиночного імпульсу. Порівняно, наприклад, із даними радіотелескопу GEETEE [94] (див. рис. 2.11 із Розділу 2 даної роботи), коли

при відносній смузі 11% і центральній частоті 34 МГц важко розрізнити не тільки близькі значення міри дисперсії, але й сам закон дисперсії (f^{-2} , чи f^{-1}), дані УТР-2 дозволяють **однозначно виключити зі списку сигналів, що аналізуються, радіовипромінювання всіх відомих у декаметровому діапазоні пульсарів.**

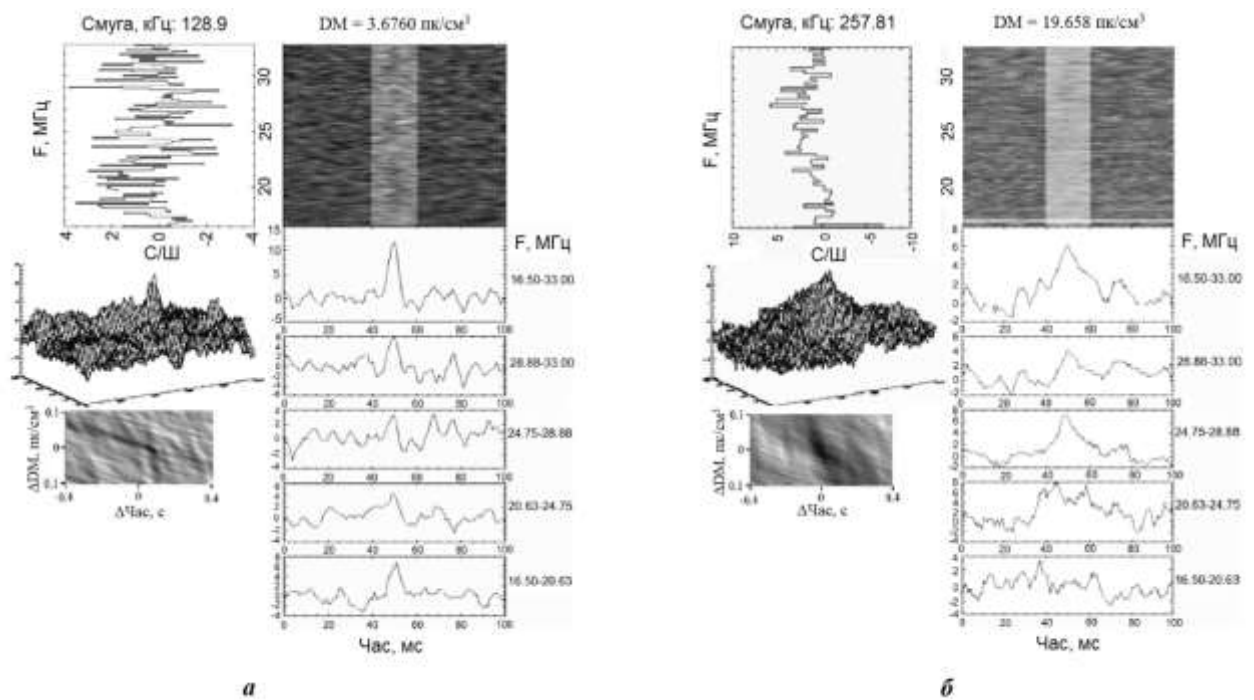
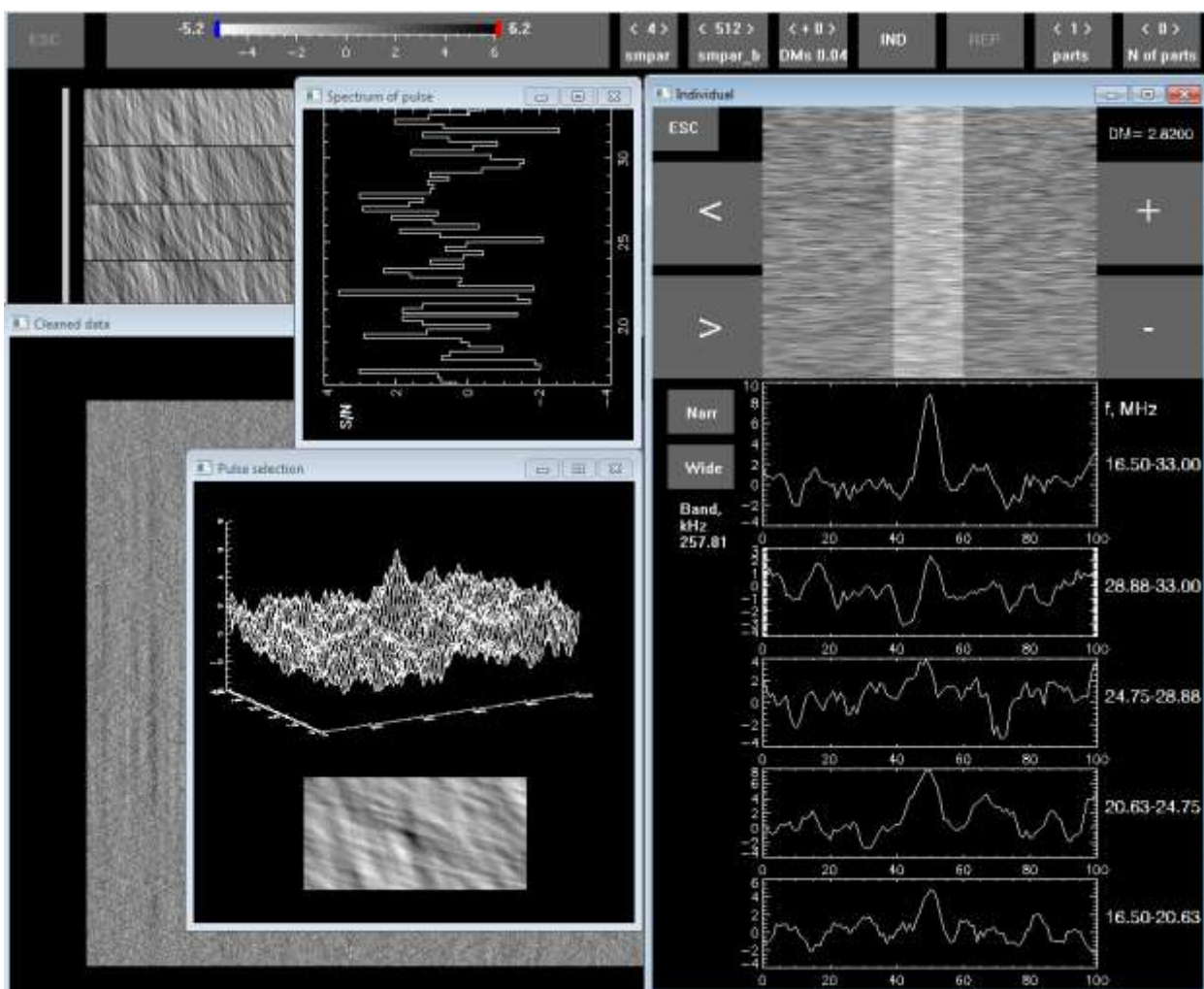
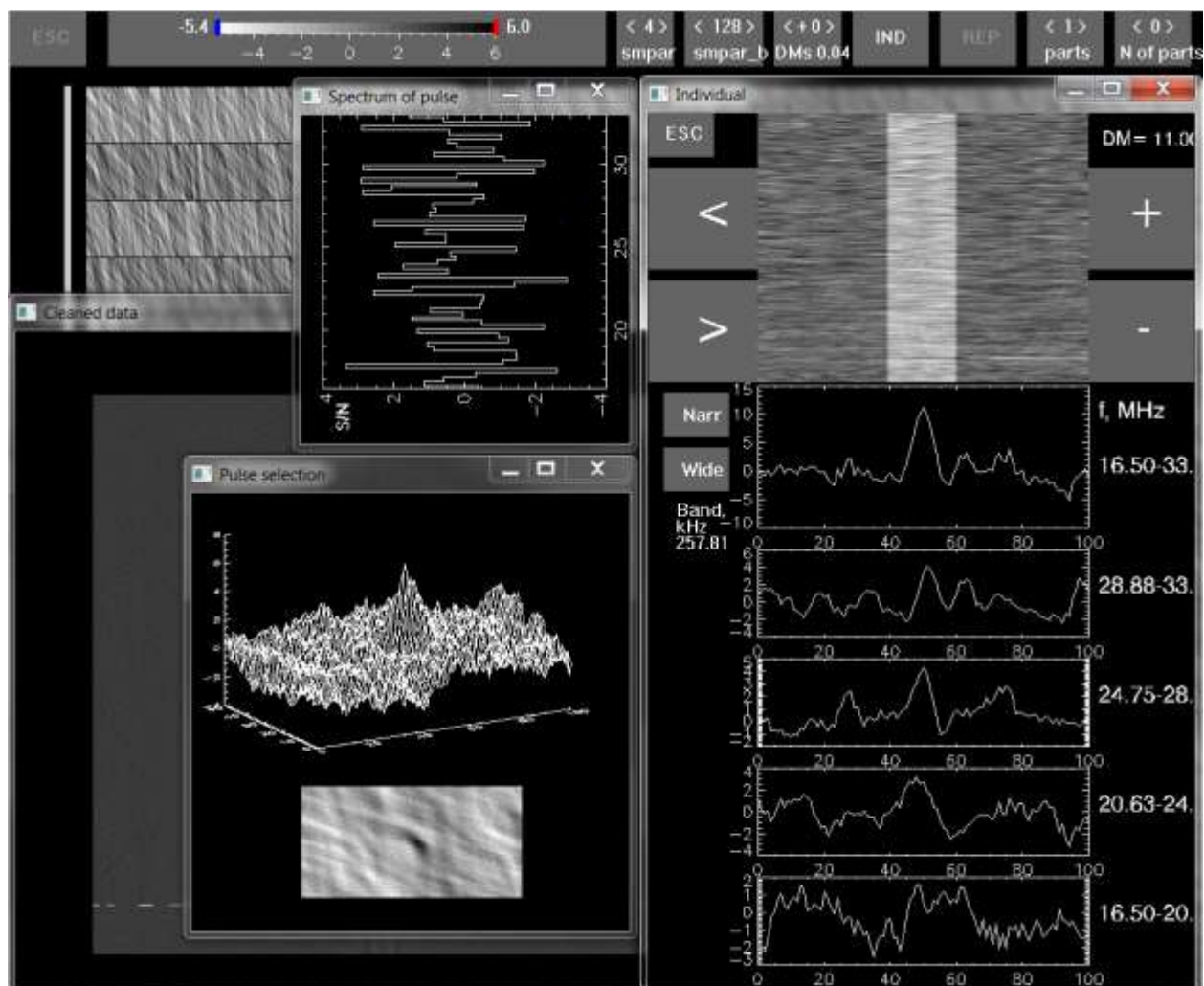


Рис. 3.10. Приклад транзйєтного сигналу вiд невiдомого джерела (а) та слабкий iмпульс пульсара PSRB1508+55 (б) [109].

Розроблений набiр програм дозволив iдентифiкувати завади, якi неможливо було вiдрiзнити вiд корисних сигналiв, оскiльки крок за мiрою дисперсiї був завеликим, а також тому, що не були наочно й одночасно представленi всi етапи обробки. На рис. 3.12 наведений приклад радiочастотної завади. Через вiдносну вузькосмуговiсть сигналу, його закон дисперсiї було значно складнiше iдентифiкувати, нiж на нижнiй панелi рис. 2.17 (див. попереднiй роздiл). Завдяки налаштуванню параметрiв, при детальнiму аналізi були виявленi слiди «замивання» максимуму DM i в первинних даних був знайдений вiдповiдний сигнал (очищений, але не дедиспергований). Пiсля

настроювання контрасту на зображенні був проявлений завадовий сигнал явно штучного походження.





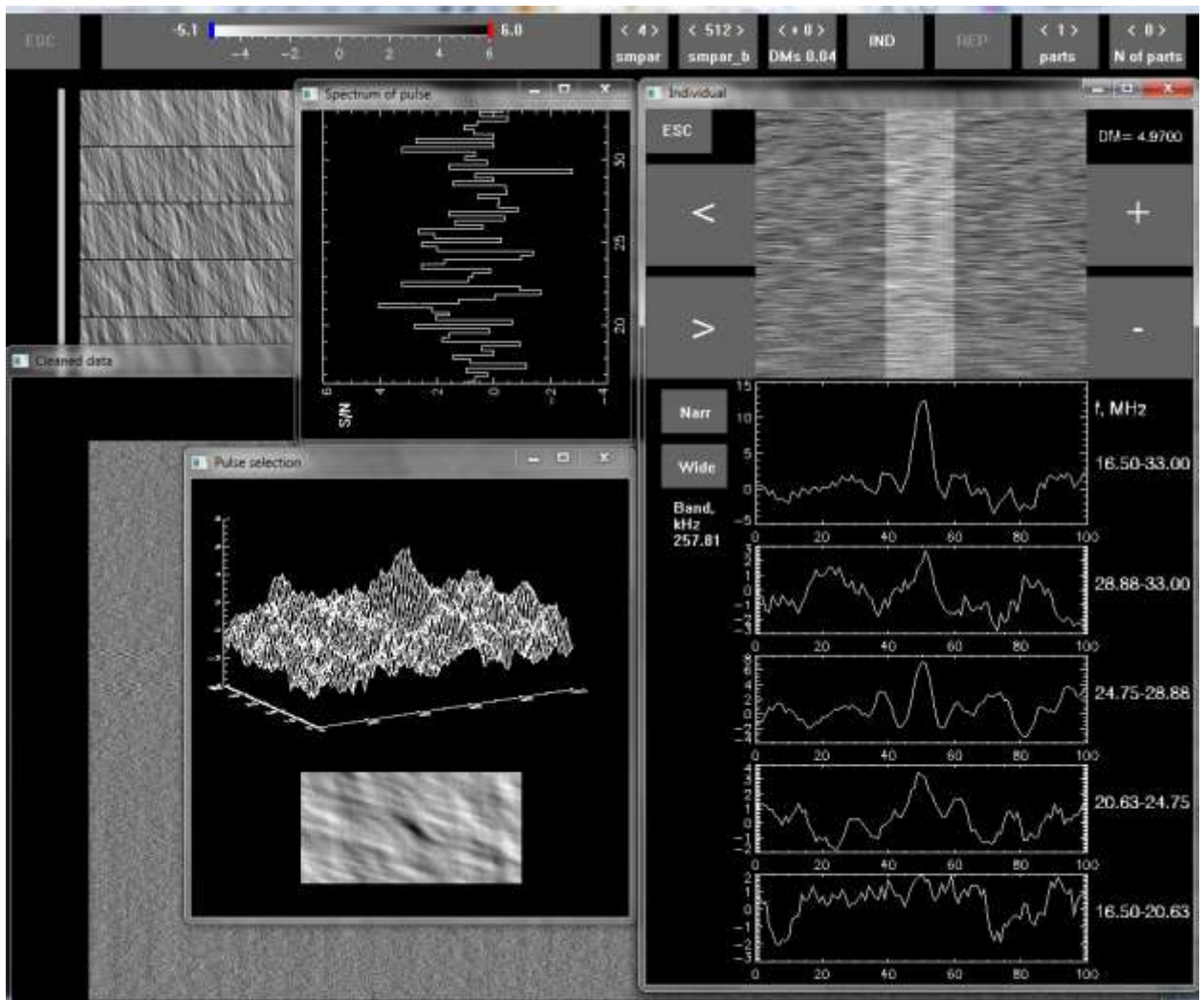


Рис. 3.11. Декілька продетектованих транзійтних сигналів.

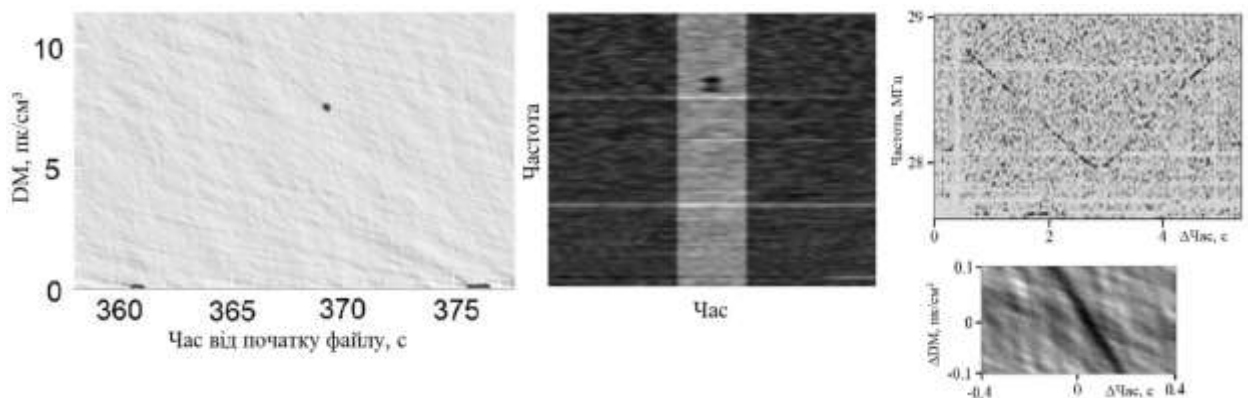


Рис. 3.12. Приклад радіочастотної завади, що виявлена за допомогою «короткого конвеєра». На лівій панелі показаний сигнал, знайдений за допомогою «довгого конвеєра». При візуальній перевірці космічна природа цього сигналу не викликала сумніву. А на середній і правій панелі показаний

результат роботи з тим самим сигналом програми перевірки – «короткого конвеєра» [109].

Завдяки аналізу за допомогою нового набору процедур було оброблено всі події та відсіяно велику кількість (близько 70%) сигналів-кандидатів, які були відібрані на попередніх етапах (див. Розділ 2).

Із приблизно 3300 кандидатів, було відібрано 982 сигнали, що відповідають критеріям космічного походження. За допомогою короткого конвеєра також були уточнені значення міри дисперсії, форми імпульсів, співвідношення «С/Ш» транзієнтів. Параметри цих сигналів були занесені до бази даних, фрагмент якої наведений на рис. 3.13 (повна база даних сигналів наведена у Додатку В). Параметри, наведені в цій базі, такі (стовпчики таблиці зліва направо):

- Code&Date – код V (направляючий косинус наведення радіотелескопу УТР-2 по зенітному куту), запис якого здійснюється, і дата цього запису;
- Beam – промінь, у якому проявилася подія (A, B, C, D або E);
- Event – номер файлу даних і картинки, у якій знайдено сигнал (наприклад, «63 11» означає файл №63 і картинку №11);
- Time from start – час від початку запису (в секундах), даний параметр прямо пов'язаний із попереднім, тобто з цього часу можна отримати номер відповідного файлу та картинки;
- RA – пряме піднесення променя в момент детектування події;
- dec – схилення (declination) центрального променя, що відповідає даному коду V;
- DM – значення міри дисперсії сигналу, що визначене програмою автоматичного пошуку імпульсів у межах довгого конвеєра;
- SNR – співвідношення «Сигнал/Шум» сигналу, також визначене програмою автоматичного пошуку;

- DM_corr – значення міри дисперсії, відкориговане при обробці сигналу програмою детального, напівавтоматичного аналізу кожного імпульсу («коротким конвеєром»);
- SNR_corr – значення співвідношення «Сигнал/Шум», що отримане при обробці сигналу «коротким конвеєром».

Code&Date	Beam	Event	Time from start	RA	dec	DM	SNR	DM_corr	SNR_corr
V341/Mar2013	A	63 11	32622.0	15.531381	29.362592	8.1800003	6.2721796	8.188	9
	B	82 13	42569.5	18.294535	29.779599	11.770000	6.2839146	11.768	3.8
	C	44 12	22751.4	12.789461	30.195515	16.200001	6.6073127	16.196	6.5
		74 16	38509.7	17.166752	30.195515	3.1500001	6.0885706	3.146	6.3
	D	9 15	4628.47	7.7552521	30.610363	18.160000	6.1890702	18.158	4.5
		11 5	5356.21	7.9574030	30.610363	24.620001	6.0010648	24.624	6.5
	E	31 7	15819.7	10.863885	31.024181	17.260000	6.9806209	17.26	5.2
		34 13	17598.5	11.357998	31.024181	26.080000	6.0745354	26.084	8
		46 4	23552.5	13.011891	31.024181	10.900000	6.2617102	10.902	8.5

Рис. 3.13. Фрагмент бази даних параметрів транзієнтів, виявлених у березні 2013 року при спостереженні коду V = 341 (координати центрального променя приблизно відповідають значенню $\delta = 30.18^\circ$).

3.2. Розподіл сигналів за часом появи. Тест із від'ємною DM

Слід навести проміжні підсумки пошуку в даних Огляду транзієнтних сигналів космічних джерел випромінювання. Отже, із записаних близько 5000 годин однопроменевих даних спостережень, автоматичними програмами пошуку на першому етапі аналізу було виділено ~ 200 сигналів із мірою дисперсії більше 4 пк/см^3 та співвідношенням С/Ш більше 8.

Переважаючою більшістю таких сигналів виявились імпульси відомих пульсарів (таких, як PSRB0834+06, PSRB0809+74, PSRB0950+08) та відкритого в Огляді декаметрового випромінювання PSR J0243+6257 [86]. При значному співвідношенні С/Ш (як у Розділі 2 на рис. 2.15) на площині «Час – Міра дисперсії» відгук (при смузі сигналу не більше 1–2 МГц) може займати широкий інтервал значень. При візуальному контролі ні самі сигнали пульсарів, ні суміжні з ними максимуми не бралися для подальшої обробки. Іншими сигналами із С/Ш більше 8 виявились сигнали, які на спектрограмі мали явні ознаки радіозавад.

На другому етапі проводилась попередня обробка сигналів зі значенням С/Ш не менше 5.5σ . Цей поріг було визначено експериментально. Він був достатньо низьким для фіксації індивідуальних імпульсів пульсарів, а отже, для пошуку імпульсних сигналів подібних джерел. У середньому, при спокійній завадовій обстановці, середній час між продетектованими сигналами складав 4–10 годин. Далі такі сигнали перевірялися візуально на зображеннях «Час - Міра дисперсії». Потрібно зазначити, що великі зображення (4096×3000) були конвертовані до розміру 1024×1000 , що зменшило їх кількість, яку потрібно було аналізувати, із приблизно 7 мільйонів до 550 тисяч. Автоматична обробка та візуальний контроль однієї години спостережень займала приблизно 12 годин часу. 5000 годин оброблялось 60000 годин (на робочій станції із процесором i7-3770 і оперативною пам'яттю 32 Гб), що при одному конвеєрі зайняло б 6.84 року. Наявність декількох конвеєрів (окремі комп'ютери на кожен етап обробки з автоматичною обробкою всіх файлів даних, що з'являються) дозволило зменшити час обробки приблизно до 3 років.

Потім із отриманих сигналів-кандидатів були виключені всі сигнали з мірою дисперсії менше 1.5 пк/см^3 і всі ті, що знаходились у структурах, пов'язаних із завадами на нульових мірах дисперсії. Після цього в базі даних сигналів залишилося близько 3300 «кандидатів».

Побудований розподіл кількості цих сигналів залежно від часу спостережень показав [114, 115], що ці події не демонструють жодної концентрації довкола ранкових годин і розподіляються за часом приблизно рівномірно, що додатково свідчить на користь їх не завадової природи (рис. 3.14).

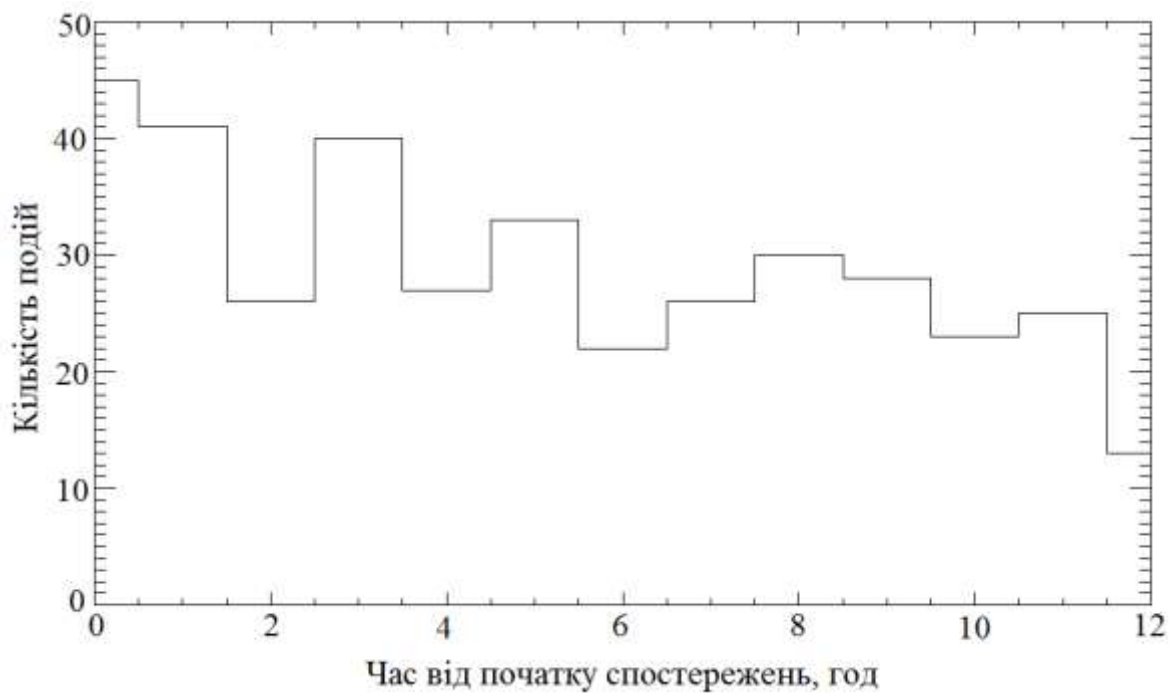


Рис. 3.14. Розподіл кількості подій у залежності від часу сеансу спостережень (380 сигналів, які мають С/Ш більше 8).

При проведенні цього дослідження немає можливості спиратися на додаткові критерії доведення космічної природи випромінювання. Проте можна виключити всі можливі джерела ймовірних низькоінтенсивних завад, які мають частотні залежності близькі до тих, що існують у транзійтних сигналів. Найважливішим тестом, із цієї точки зору, є перевірка наявності сигналів із часовою затримкою, пропорційною не f^{-2} , а $-f^{-2}$, тобто в таких сигналів низькі частоти повинні «випереджати» в часі приходу високі з такою ж самою абсолютною часовою затримкою [72]. Цінність цього тесту полягає у двох аспектах. По-перше, модуляція інтенсивності континуальних джерел випромінювання іоносферними мерехтіннями, що часто зустрічається на декаметрових хвилях, має достатньо широкий спектр і схожий частотний нахил (рис. 3.15). Априорі не можна виключити того, що значна частина прийнятих сигналів є короткими за часом мерехтіннями континуального випромінювання космічних джерел на неоднорідностях іоносфери. І, що дуже важливо, запізнення та випередження нижніх частот по відношенню до верхніх зустрічається при мерехтіннях із приблизно однаковою ймовірністю.

Тому перевірка наявності сигналів із затримкою між частотами, пропорційною $-f^{-2}$, ймовірно, дозволить виявити частку сигналів, що породжені мерехтіннями (та мають при цьому часово-частотну залежність, пропорційну f^{-2}). І другий аспект. Якщо використовувати інвертовані за часом дані спостережень (рис. 3.16), а не створювати програму дедиспергування під «зворотню» міру дисперсії, то можна перевірити, чи не продукує наявна програма обробки якихось артефактів. Слід зазначити, що за часом, витраченим на розрахунки, цей тест довший за короткий конвеєр обробки даних, що використовується в Огляді. Проводити повну обробку даних було б дуже затратно з точки зору використаного часу. Але характерні риси сигналів із «прямою» і «зворотною» мірами дисперсії можна отримати вже при аналізі частини даних.

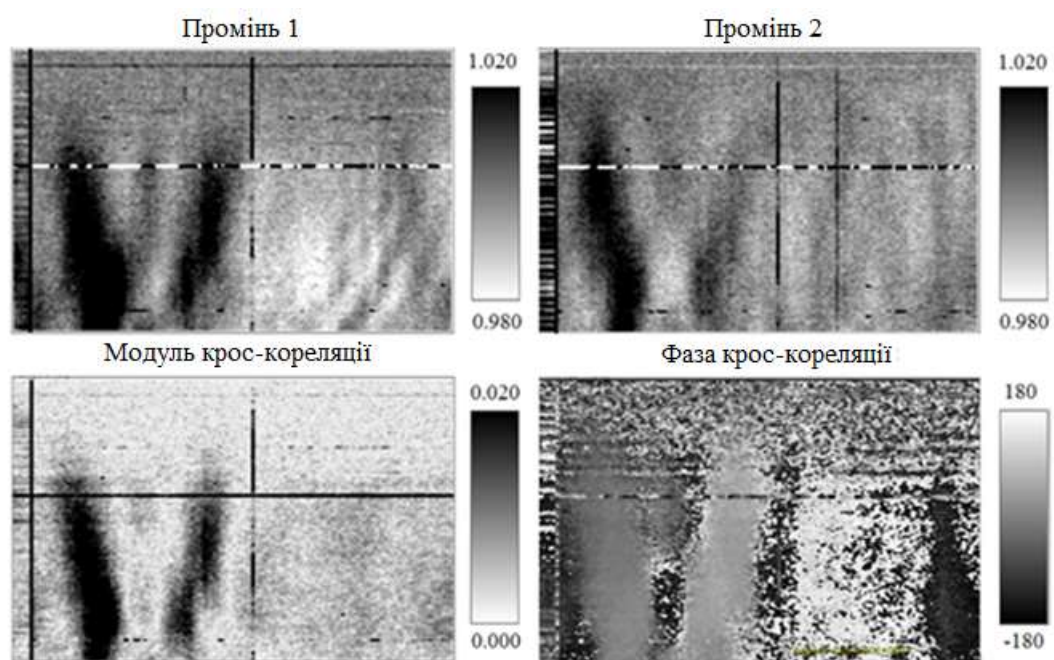


Рис. 3.15. Приклади широкосмугових мерехтінь із різним частотно-часовим нахилом. Тривалість кадру складає 120 с.

Як було сказано раніше, конвеєрна обробка даних Огляду призначена для очистки від потужних радіозавад [92], усунення дисперсійної затримки з певним кроком у діапазоні 0–30 пк/см³, а також наступного сумування даних

за частотами. При аналізі індивідуальних подій можливості редукції даних обмежені. Їх вихідний обсяг складає близько 100 Тб. Для сліпого пошуку транзйєнтних сигналів у всьому діапазоні DM із кроком 0.01 пк/см³, сумування 4096 частотних каналів із різним часовим зсувом між ними необхідно проводити 3000 разів (пояснення надане далі). Тому після обробки кількість даних зменшується всього на ~ 27%.

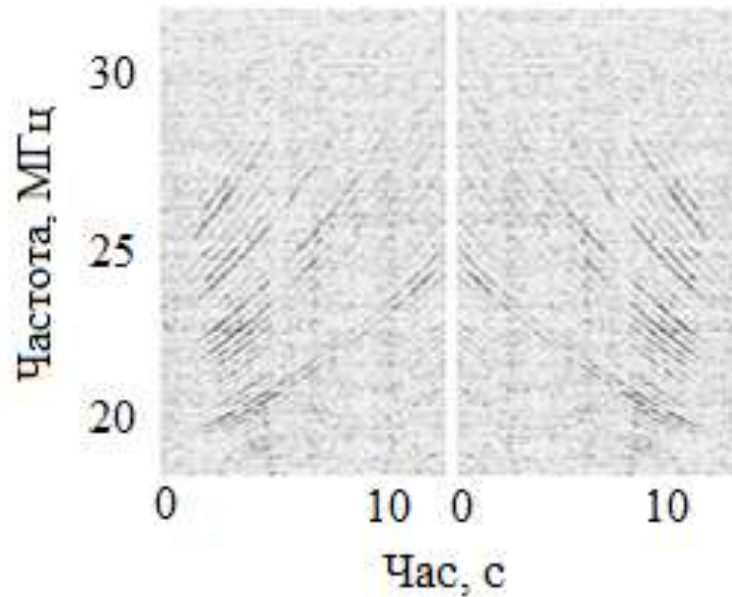


Рис. 3.16. Сигнали пульсара PSRB0809+74, інвертовані в часі для аналізу зі «зворотньою» дисперсійною залежністю (зліва). Справа для порівняння наведені вихідні дані.

Як було згадано у [60], ширина імпульсів для відомих пульсарів співрозмірна (чи більша) з часовою роздільною здатністю в Огляді (8 мс). Модельні розрахунки втрати чутливості при неточному збігу істинної міри дисперсії та пробної (з якою проводиться операція дедиспергування) в припущенні, що імпульс має прямокутну форму, можна здійснити за формулою [51]:

$$\frac{F_{\delta DM}}{F} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \zeta^{-1} \text{erf}(\zeta), \quad (3.1)$$

Тут $F_{\delta DM}$ – потік, розрахований із похибкою за мірою дисперсії δDM , F – істинний потік; $\text{erf}(\dots)$ – функція похибок; ζ – безрозмірна функція,

$$\zeta = 6.91 \cdot 10^{-3} \delta DM \frac{\Delta f}{w f}, \quad (3.2)$$

де Δf – смуга частот (16 МГц), w – тривалість сигналу (100 мс), f – центральна частота (0.024 ГГц). При цих параметрах і допустимому погіршенню співвідношення (3.1) не більше, ніж на 5%, значення δDM , отримане із (3.1) і (3.2), має бути менше 0.005 пк/см^3 . Тобто при «сліпому» пошуку сигналів пульсарів і транзієнтів для отримання результатів при незначних втратах в С/Ш, бажано мати крок пробної міри дисперсії не більше 0.01 пк/см^3 . При зменшенні w (що справедливо для реального сигналу) значення δDM повинно прямопропорційно зменшуватися, що витікає з формули $w = \Delta t = \frac{10^{16}}{2.4210331} DM (f_{\min}^{-2} - f_{\max}^{-2})$. На рис. 3.17 наведений приклад дедиспергування зі значенням $\delta DM = 0.01 \text{ пк/см}^3$.

На осі абсцис наведений час у секундах (нижня шкала) і у відліках із $\Delta t = 8 \text{ мс}$ (верхня шкала). Якщо припустити, що ширина імпульсу w складає 0.1 с (приблизно 12 відліків), то стане очевидним, що значна частина імпульсу дасть вклад при накопиченні за частотою і програш $(1 - F_{\delta DM}/F)$ складе згадані 5%. Якщо ж w рівна, наприклад, 0.032 с (4 відліки), то, залежно від того, яка частина у спектрі буде вважатися центральною (або де буде максимальна щільність потоку транзієнта), втрати сигналу при інтегруванні будуть значно істотнішими (50–80%). Це означає, що для коротких сигналів початкове визначення пробної DM вимагає уточнення для отримання максимального перевищення сигналу над шумом і вірної оцінки щільності потоку, тривалості сигналу та ін. Слід також зазначити, що зменшення кроку пробного значення міри дисперсії (як у «довгому конвеєрі») із 0.01 пк/см^3 до 0.002 пк/см^3 призвело б до збільшення часу розрахунків приблизно в 5 разів, оскільки операція дедиспергування є

найбільш затратною за використаним комп'ютерним часом. Крім того, в 5 разів збільшаться витрати на вибір транзйєнтних сигналів дослідником під час візуального аналізу отриманих результатів. Тому ясно, що крок за мірою дисперсії був обраний із умов компромісу збереження достатньої точності та мінімізації часу обробки.

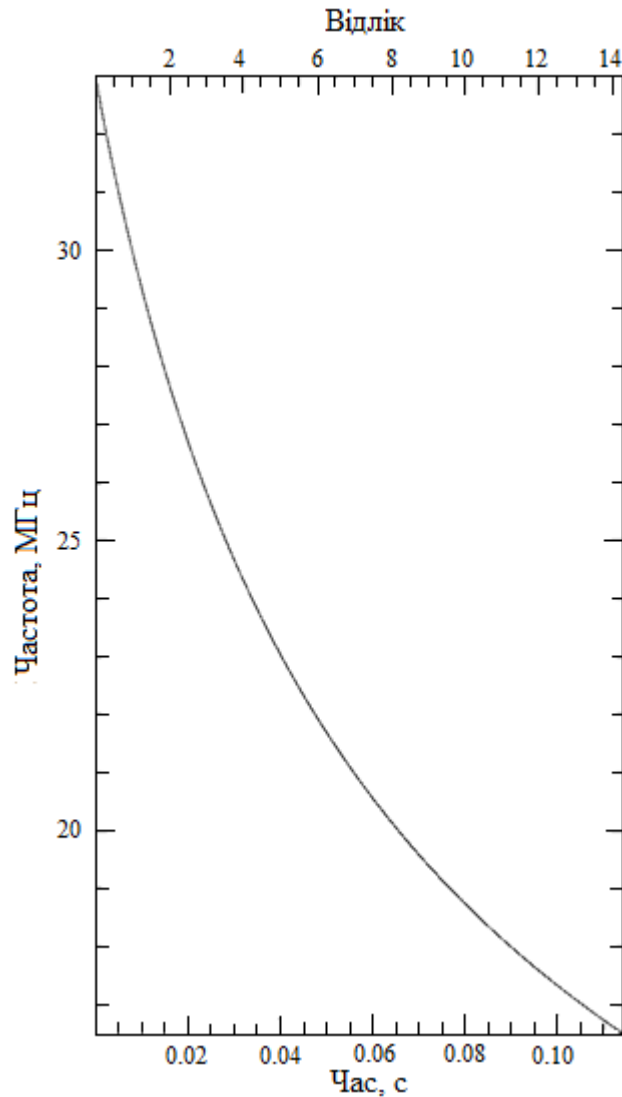


Рис. 3.17. Приклад дедиспергування зі значенням $\delta DM = 0.01$ пк/см³. На осі абсцис наведений час у секундах (нижня шкала) і відліки (верхня шкала).

Як вже було сказано раніше, зазвичай всі завади концентруються в області нульової міри дисперсії. Вузькосмугові завади, розташовані в різних частотних смугах, при операції дедиспергування можуть при накопиченні за

частотою породжувати різноманітні регулярні структури на площині «Час – Міра дисперсії», як було показано в Розділі 2.

Шанс проявитися при значеннях DM більше $2\text{--}3 \text{ пк/см}^3$ мають тільки ті широкосмугові завади, які мають закон частотно-часової залежності дуже близький до закону дисперсії (f^{-2}). Відмінність показника степеню від 2 лише на один відсоток (0.02) призводить до того, що широкосмуговий сигнал (наприклад, $20 \div 25 \text{ МГц}$) при дедиспергуванні «вивалюється» з вікна шириною $\pm 80 \text{ мс}$ («підсвічена» центральна частина спектрограми імпульсу на рис. 3.7, правий верхній кут).

Найважливішим є питання: чи не є сигнали, подібні наведеному на рис. 3.10а, типовими не лише для імпульсів пульсарів (приклади будуть наведені пізніше), але й для джерел континуального випромінювання, інтенсивність яких сильно модульована ефектами мерехтінь (рис. 3.15)?

Незважаючи на те, що при обробці даних Огляду використовується фільтр верхніх частот із частотою зрізу 0.25 Гц , можна припустити, що найбільш інтенсивні та короткі підвищення інтенсивності континуальних джерел можуть проходити крізь фільтр і відображатися в схожому на транзйентні сигнали вигляді. Крім того, можна припустити, що часова затримка (яка для транзйентних сигналів пропорційна f^{-2}) для континуальних сигналів, що потрапили під дію мерехтінь, може мати і протилежний знак ($-f^{-2}$). Також можна припустити, що програма конвеєрної обробки помилково ідентифікує набори вузькосмугових завад, які випадково співпадають, як широкосмугові транзйентні сигнали.

Для перевірки цих припущень був проведений аналіз, у першу чергу, сигналів, що виявлені при тих положеннях променя антени, які мали максимальний зенітний кут ($50\text{--}60^\circ$, тобто схилення $-10\text{--}0^\circ$). При цих нахилах повинні максимально проявитися ефекти мерехтінь і детектування штучних радіозавад.

Була розроблена програма інвертування спектрограм за часом, що дозволило представити гіпотетичні сигнали з випередженням за низькими

частотами (із затримкою, що пропорційна $-f^{-2}$) як подібні транзйєнтним сигналам космйчного походження із затримкою мйж нижнйми та верхнйми частотами, пропорцйною $+f^{-2}$. Програми наступних етапйв обробки не будуть «знати», який сигнал приходить на йх вхйд й будуть дйяти однаково як для реальних, так й для йнвертованих за часом сигналйв.

Була проведена обробка близько 10% даних зй «зворотньою» мйрою дисперсйй. Найважливша вйдмйннйсть полягає в тому, що серед сигналйв, якй продетектованй зй «зворотньою» мйрою дисперсйй, поки що не було знайдено жодного, який задовольняв би всйм вимогам, якй пред'являютьсй сигналам-кандидатам: наявнйсть достатньої широкосмуговостй, присутнйсть вираженого максимуму як у сумарнйй смузй аналізу, так й в субсмугах окремо й т. д. Порйвняння наведено на рис. 3.18.

Оскйльки при обробцй даних Огляду було видйлено 982 сигнали-кандидати (при 410 «смугах» – записах променйв радйотелескопу УТР-2 йз тривалйстю сеансу вйд 10 до 15 годин), то середня частота детектування складає приблизно одну подйю за 5 годин спостережень. Тривалйсть перевйрених даних зй «зворотньою» мйрою дисперсйй – близько 500 годин. Й оскйльки не було виявлено жодного сигналу зй «зворотньою» мйрою дисперсйй, що вйдповйдає всйм вищезгаданим критерйям, то можна стверджувати, що ймовйрнйсть детектування сигналйв-кандидатйв у такому випадку на два порядки нижча. Незважаючи на те, що повноцйнних кандидатйв у записах зй «зворотньою» мйрою дисперсйй виявлено не було, було проведено порйвняння сигналйв йз «прямою» мйрою дисперсйй та сигналйв зй «зворотньою» DM, якй перевищили обраний порйг детектування (й були обранй при вйзуальнйй перевйрцй картинок, створених програмою автоматичного пошуку йнтенсивних йндивидуальних ймпульсйв). Дуже важливо, що це дає можливйсть обрати новий порйг (8σ), який вйдсйкає всй сигнали, продетектованй зй «зворотньою» мйрою дисперсйй.

На рис. 3.18а наведений приклад детектування сигналу зй «зворотньою» DM. Вгорй малюнку (а) видно, що в сумарнйй смузй йснує слабкий максимум,

але в субсмугах відповідного максимуму немає. Також, для наочності, на двовимірній залежності «DM – Час» на рисунках (а) і (б) позначені центри.

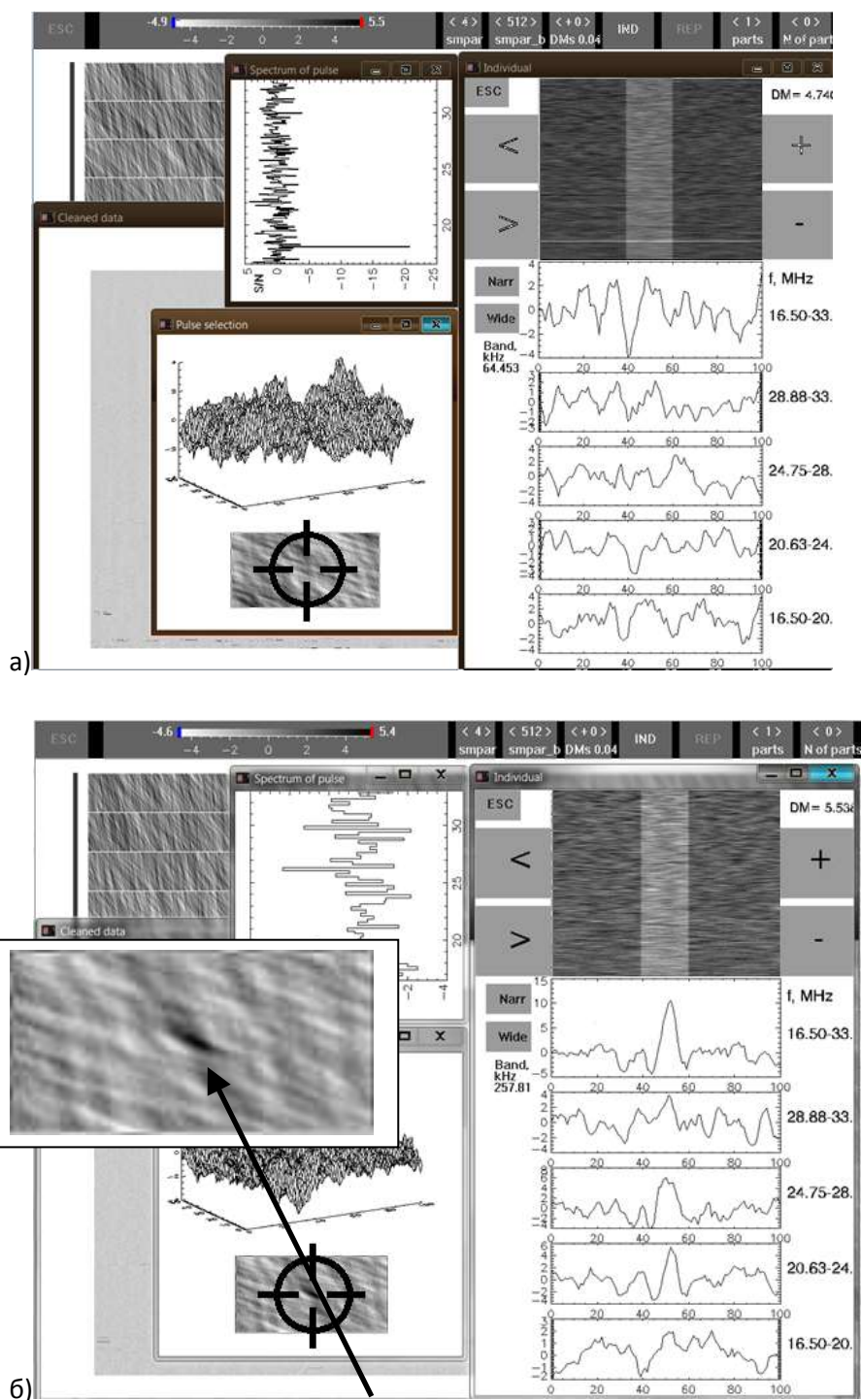


Рис. 3.18. Відмінності в детектуванні завади (а) з $DM = -4.740$ пк/см³ і транзієнта (б) із $DM = 5.538$ пк/см³. У центрі двовимірної залежності «DM – Час» на рисунку (б) видно похилий овал.

На рис. 3.18а, який був отриманий при обробці інверсної спектрограми та дав максимум співвідношення С/Ш (~ 7) на мірі дисперсії -4.560 пк/см^3 , у центрі залежності «DM – Час» не видно ніяких ознак існування похилого овалу, що показаний на рис. 2.16 (див. Розділ 2). Тобто програма відбору «кандидатів» зафіксувала перевищення порогу в кількох точках (не менш, ніж у двох), але вони не є частиною відносно великого за кількістю точок характерного овалу. Навпаки, на рис. 3.18б цей похилий овал добре видно (крупно показаний на виносці). Що це означає з точки зору спектру сигналу? Із рис. 2.12 чудово видно, що безперервний «овал» був отриманий із досить тривалого, широкосмугового сигналу. Уявімо, що сигнал має максимум лише на деяких частотах, що рознесені достатньо далеко в спектрі (наприклад, на частотах 20, 25 і 30 МГц на рис. 2.12, ліві панелі), а його тривалість складає один відлік. Тоді при найменшій зміні пробної міри дисперсії просумований за частотою сигнал просто «розвалиться», тобто його С/Ш стане близьким до 1, що й відбувається з сигналами завад.

Зрозуміло, що при первинній обробці, у випадку слабкого широкосмугового сигналу, якщо пробна міра дисперсії не точно співпадає з істинною DM імпульсу, то, підстроюючи DM із кроком 0.002 пк/см^3 при обробці «коротким» конвеєром, можна значно підвищити співвідношення С/Ш (див. рис. 2.16 і рис. 3.17). Для випадкових максимумів інтенсивності або кількох вузькосмугових завад, що випадково співпали, такий ефект не спостерігається.

На рис. 3.19 окремо виділені двовимірні залежності «DM – Час» (± 25 кроків за DM із розміром кроку 0.004 пк/см^3 і ± 50 кроків за часом із інтервалом 8 мс) для сигналів, що продетектовані з «прямою» та «зворотною» мірами дисперсії. На рисунку явно помітно кардинальну різницю між сигналами-кандидатами (зліва) та сигналами, що були знайдені при аналізі з дисперсійною залежністю, пропорційною $-f^{-2}$. Характерний овал для сигналів-кандидатів видно у випадку кожного сигналу з «прямою» мірою дисперсії. Невеликі зсуви відносно центру пов'язані з тим, що для

максимізації С/Ш була підібрана більш точна пробна міра дисперсії та часовий відлік, у якому існує максимум сигналу.

Для сигналів, що знайдені зі «зворотною» мірою дисперсії ($-f^{-2}$), такий широкий максимум із похилим овалом не спостерігається. Як показано на рис. 3.18а, завади та шуми можуть створити максимум сигналу, що перевищує поріг виявлення 5.5σ . Проте подальші спроби збільшити співвідношення С/Ш при аналізі коротким конвеєром (зокрема, варіюванням DM у межах 0.01 пк/см^3), результату практично не дають. Це стає очевидним при порівнянні розподілів С/Ш для сигналів із f^{-2} та $-f^{-2}$, що наведені на рис. 3.20. На ньому показані (в логарифмічних координатах) співвідношення С/Ш для продетектованих сигналів із «прямою» (згори) та «зворотною» (внизу) мірами дисперсії.

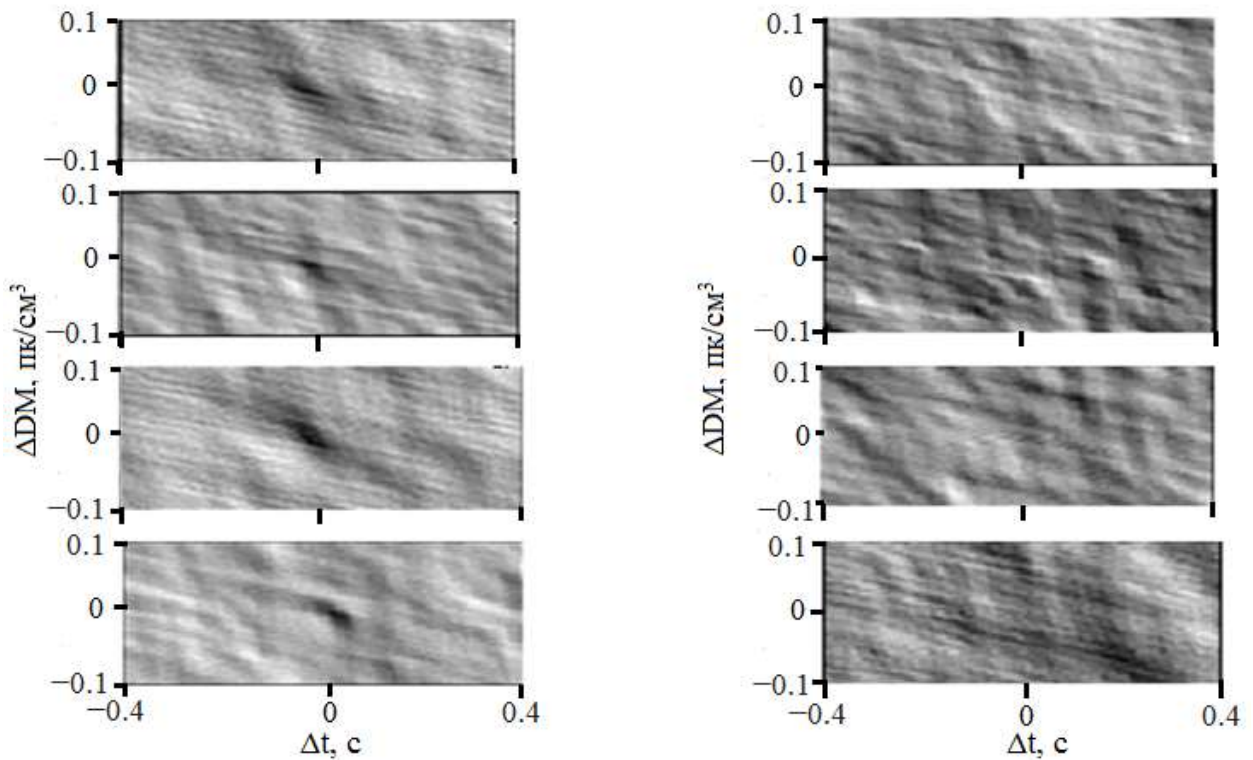
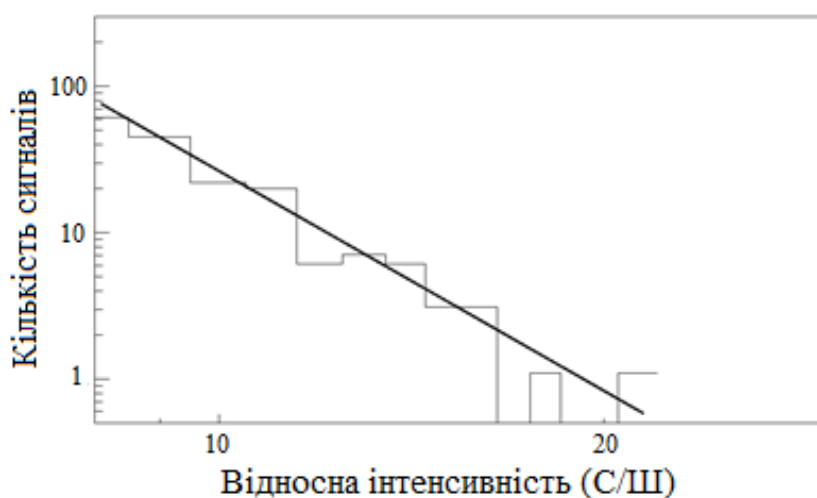


Рис. 3.19. Двовимірні залежності «DM – Час» ($\pm 0.1 \text{ пк/см}^3$ за DM і $\pm 400 \text{ мс}$ – за часом). Зліва – сигнали-кандидати, знайдені в Огляді. Справа – залежності «DM – Час» для «зворотної» міри дисперсії (дисперсійне запізнення пропорційне $-f^{-2}$). Для сигналів-кандидатів характерна наявність похилого

овалу підвищеної інтенсивності в центрі. У сигналів, що знайдені при інвертуванні спектрограм, такий широкий максимум не спостерігається.

Відмінність очевидна не тільки в значеннях співвідношення С/Ш, але й у розподілі сигналів. Кількість імпульсів зі «зворотньою» мірою дисперсії рівна 100, з яких лише один перевищує значення $C/\Pi = 7$ (7.11σ). Для сигналів-кандидатів С/Ш досягає 25, причому в розподілі присутній степеневий «хвіст», який характерний для розподілу ймовірності появи аномально інтенсивних і гігантських імпульсів пульсара залежно від їх енергії (див. рис. 1.2 і рис. 1.3 у Розділі 1).

Що стосується кількості зареєстрованих сигналів-кандидатів і тих, які перевищили рівень детектування, отриманий при даному тестуванні, то всього з більш, ніж 1000 сигналів тих, що перевищують значення $C/\Pi = 8$ (обраний новий пороговий рівень, який, судячи з максимального співвідношення С/Ш у сигналів, знайдених в інвертованих даних ($C/\Pi = 7$), обов'язково дозволить виключити зі списку кандидатів всі ймовірні низькоінтенсивні завади), виявилось близько третини (380).



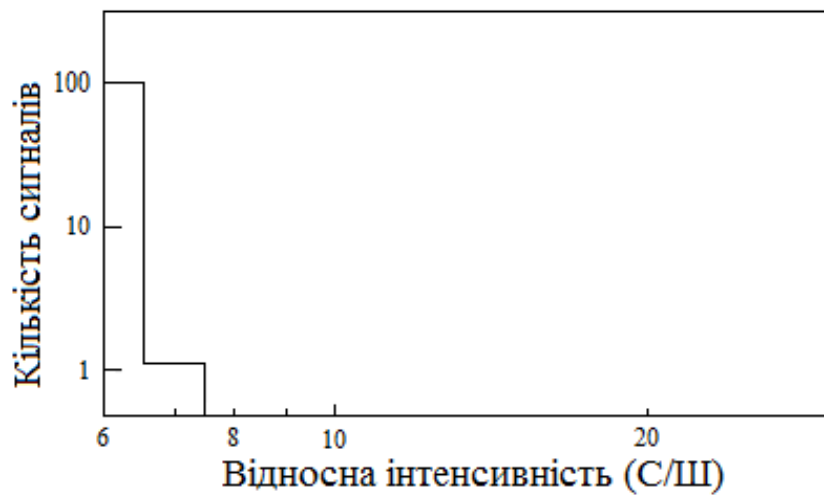


Рис. 3.20. Співвідношення С/Ш (у логарифмічних координатах) для продетектованих сигналів із «прямою» (згори) і «зворотньою» (внизу) мірами дисперсії.

3.3. Розподіли сигналів за мірою дисперсії

Наступною важливою характеристикою є розподіл імпульсів за мірою дисперсії. Як вже було показано, автоматичні та напівавтоматичні процедури відбору дозволили відсіяти величезну кількість потужних радіозавад. Вони були розташовані, здебільшого, поблизу нульових мір дисперсії. Як було сказано раніше, досліджуваний інтервал DM лежить у межах від 0 до 30 пк/см³. Оскільки на мірах дисперсії 1.5 пк/см³ і менше сигналами є, здебільшого, завади, то фактично досліджуваним діапазоном міри дисперсії є $DM = 1.5 \div 30$ пк/см³. Цим значенням міри дисперсії приблизно відповідають відстані від Землі 0.1–1.5 кпк у напрямку на центр Галактики та дещо більші – у всіх інших (хоча, слід зазначити, існують деякі виділені напрямки, здебільшого – на полюси, де максимальну досліджувану в даній роботі міру дисперсії можуть мати й позагалактичні джерела, проте таких напрямків дуже мало) (рис. 3.21).



Рис. 3.21. Схематичне зображення області Галактики, що доступна для спостережень у даному огляді (без врахування вищезгаданих виділених напрямків) [72].

На рис. 3.1 наведено розрахований на основі параметрів відомих пульсарів модельний розподіл пульсарів, що, потенційно, будуть відкриті в проєкті SKA на частотах 50-350 МГц (сірі стовпчики) та вище 350 МГц (прозорі) [9]. Вигляд гістограм пояснюється тим, що при малих відстанях до спостерігача, збільшення цієї відстані призводить до збільшення області, в якій розташовуються нейтронні зорі. Але після деякого значення світність слабких джерел (пульсарів або транзієнтів) робить їх невидимими для радіотелескопу. І, найголовніше, через зростання розсіювання з відстанню до джерела імпульсного радіовипромінювання, у міжзоряному середовищі сигнали зменшуються за амплітудою, «розмазуються» в часі й імпульси, що йдуть послідовно, стають нерозрізненними. Ці два фактори призводять до того, що за максимумом гістограми слідує падіння числа імпульсних джерел, які можна виявити, до дуже малої їх кількості. Зі зниженням частоти, через зростання приблизно в 4-ій степені сталої часу розсіювання, максимум на діаграмі повинен з'являтися на все менших значеннях DM. Цей рисунок важливий для розуміння того, який вигляд розподілу свідчить про детектування джерел саме космічного випромінювання. Тепер слід порівняти результати, отримані для сигналів із «прямою» та «зворотньою» мірою дисперсії. На рис. 3.22 показаний розподіл за мірою дисперсії 380 сигналів-кандидатів (згори), що знайдені при обробці даних Огляду («пряма» DM). В нижній же частині рис. 3.22 показаний аналогічний розподіл сигналів, що продетектовані зі «зворотньою» мірою дисперсії (100 подій). Він має зовсім іншу форму. Максимум знаходиться на малих значеннях міри дисперсії (3

пк/см³ – 15% від загальної кількості подій). Сигналів же з DM в інтервалі 10 ÷ 30 ПК/см³ – всього лише близько 25% від загальної кількості. Оскільки максимум розподілу тяжіє до малих мір дисперсії, то його поведінку значно легше пояснити наявністю широкосмугових завад із частотною залежністю, близькою до $-f^{-2}$, що тривають всього кілька десятків секунд.

Введення порогу 8σ виділяє 380 подій (із 982), які є заздалегідь інтенсивнішими, ніж завади, що були виявлені при тесті на «зворотню» міру дисперсії. Порівняння їх розподілу за DM із аналогічним розподілом 100 сигналів, що знайдені в інвертованих даних (зі «зворотною» DM), як вже було зазначено, наведено на рис. 3.22.

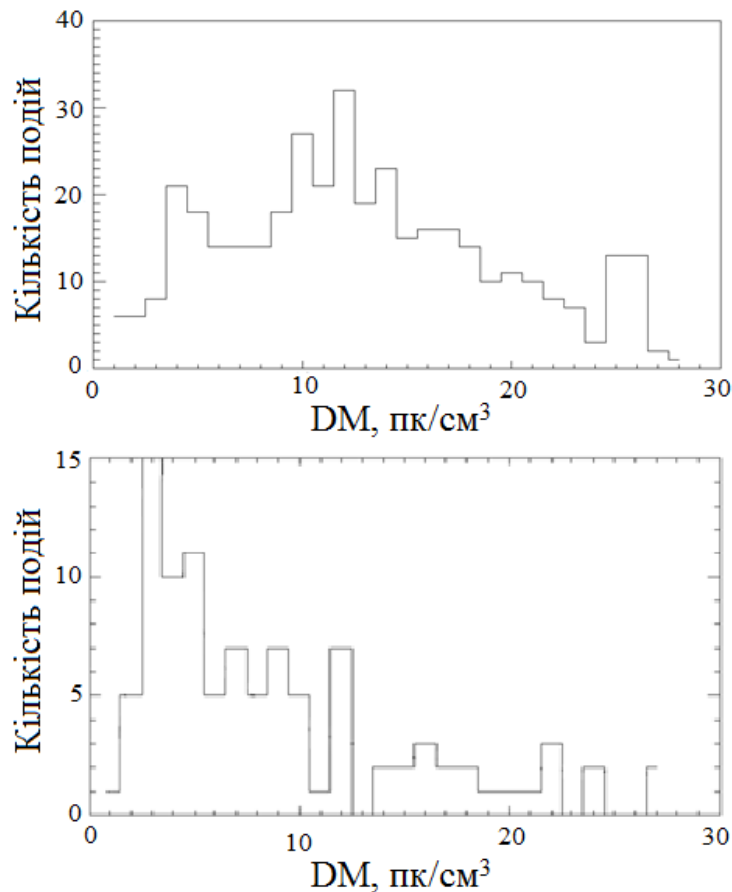


Рис. 3.22. Розподіл за мірою дисперсії 380 сигналів із $C/\Pi > 8$, продетектованих в Огляді (згори) та 100 сигналів зі «зворотніми» мірами дисперсії (внизу).

Як бачимо, якісна відповідність форми розподілу 380 сигналів гістограмі на рис. 3.1 (особливо, її низькочастотній частині) свідчить на користь космічної природи знайдених кандидатів і показує значні відмінності сигналів зі «зворотньою» мірою дисперсії.

Крім того, слід зазначити, що деякі сигнали мають досить близькі значення мір дисперсії. Якщо вони походять з тієї самої області неба, то слід перевірити, чи не породжуються вони джерелами випромінювання, що повторюється, такими як нормальні радіопульсари або радіотранзієнти, що обертаються. Цьому буде присвячена подальша робота.

3.4. Розподіли за галактичною широтою (b)

На користь детектування саме космічних сигналів говорить іще один розподіл [106]. Після визначення галактичних координат, було побудовано розподіл транзієнтів за галактичною широтою b (рис. 3.23, згори). Незважаючи на те, що нейтронні зорі концентруються в області центральної частини диску Галактики (рис. 3.24), на таких невеликих відстанях (сотні парсек) цей ефект помітно слабо. Розподіл близьких пульсарів це чітко підтверджує (рис. 3.23, знизу).

Тим не менше очевидно, що отриманий розподіл досить симетричний відносно диску Галактики та більше половини знайдених подій розташовуються в інтервалі широт $-30^\circ < b < 30^\circ$. Крім того, слід зазначити, що детектуванню імпульсних сигналів у напрямку центру й антицентру Галактики при малих значеннях b дуже заважає помітне збільшення яскравісної температури галактичного фону (див. рис. 6 у [60]). Цим можна пояснити відсутність збільшення кількості транзієнтів при малих значеннях b (рис. 3.23, згори).

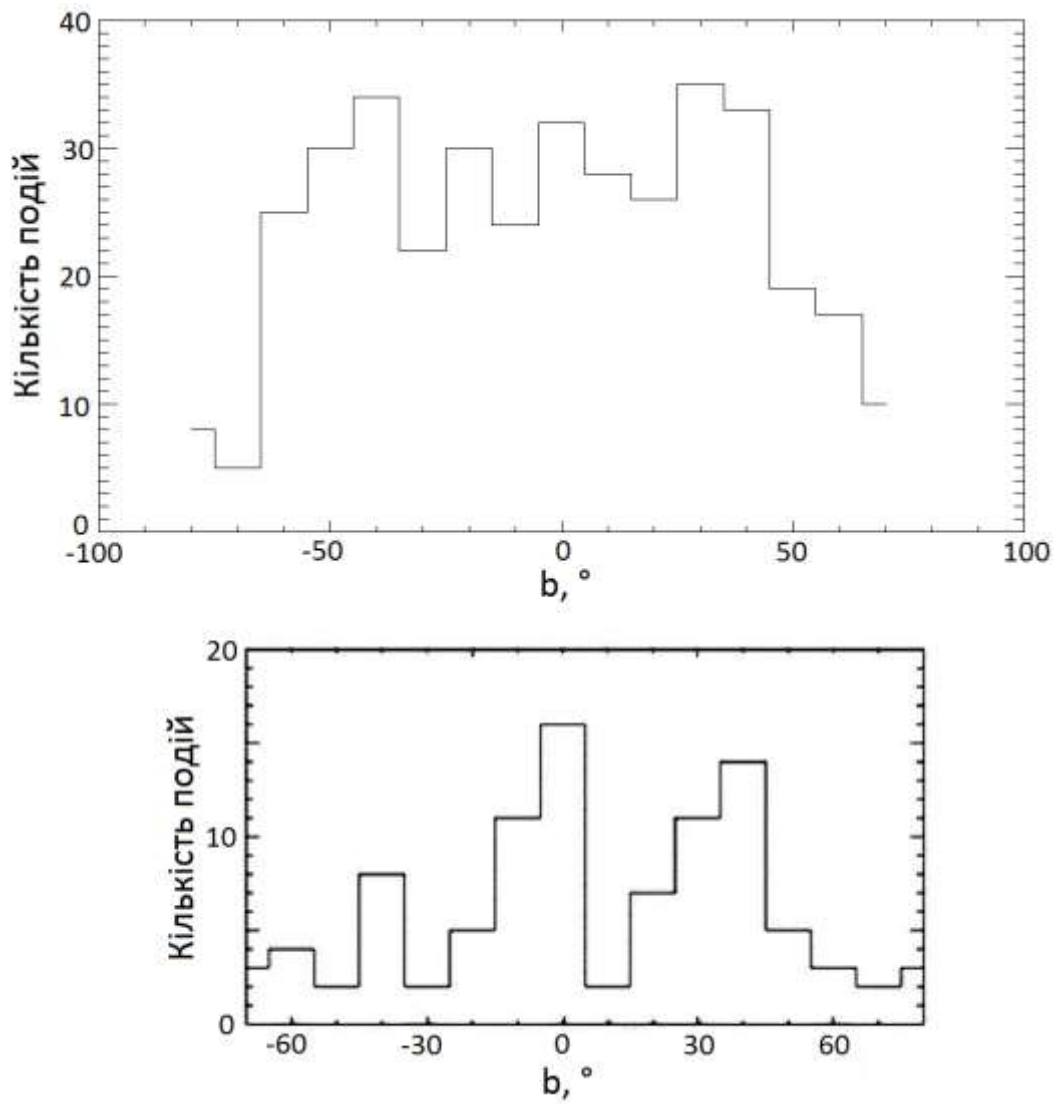


Рис. 3.23. Гістограми розподілів за галактичною широтою знайдених в Огляді сигналів-кандидатів (верхня панель) і відомих пульсарів із $DM < 30$ пк/см^3 і періодом, більшим за 0.2 с (нижня панель, 98 близьких пульсарів) [61].

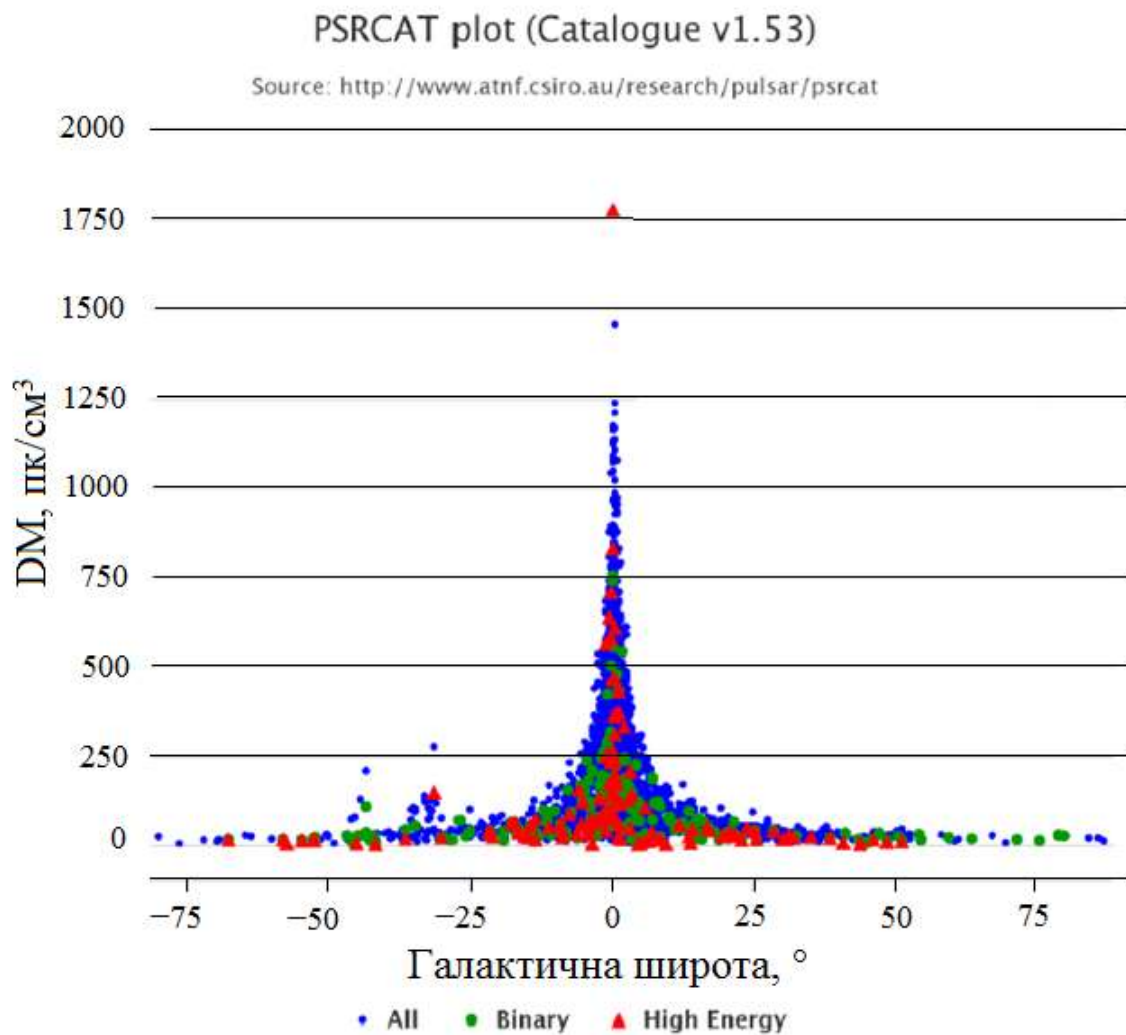


Рис. 3.24. Розподіл DM відомих пульсарів із каталогу ATNF за галактичною широтою [61].

Досить велику кількість імпульсних сигналів із унікальними значеннями міри дисперсії, які надійно відрізняються один від одного та від значень DM відомих пульсарів, слід проаналізувати.

Оскільки конус випромінювання пульсарів розширюється приблизно у 2 рази [60] навіть у випадку близьких частот (100 і 25 МГц), то кількість доступних для спостереження пульсарів зростає приблизно в тій самій пропорції. Відомих пульсарів із мірою дисперсії до 30 пк/см^3 і які мають координати, доступні для УТР-2, налічується близько 80. Це не вичерпна їх кількість, оскільки нещодавно було знайдено ще декілька [83]. Тому для оцінки можна припустити, що 100 пульсарів доступні для спостережень на

високих частотах, а вдвічі більше – 200 – доступно для детектування на низьких частотах. Тож крім відомих у декаметровому діапазоні 40 таких джерел, можна сподіватися на детектування ще 160 пульсарів.

Ще більшу кількість залишків наднових [5] являють собою радіотранзії, що обертаються (RRAT). Припускаючи, що їх кількість утричі більша, ніж пульсарів, можна говорити про 600 таких джерел, потенційно доступних для спостереження. Станом на даний час на високих частотах було продетектовано трохи більше ста RRAT [116], але в декаметровому діапазоні вони жодного разу не спостерігалися. Та й ідентифікація за мірою дисперсії є наразі дуже сумнівною.

Ще одним типом подібних об'єктів є одиночні радіотихі рентгенівські нейтронні зорі. Їх кількість також вважається значною (практично такою самою, як і кількість «нормальних» радіопульсарів). Цілком можливо, що XDINS також випромінюють одиночні імпульси в низькочастотному радіодіапазоні [3].

Існує також певна кількість пульсарів, які мають крутий (близько -3) спектральний індекс i , відповідно, зменшення щільності потоку на високих частотах (наприклад, PSR B0943+10). Такі джерела також можуть бути недоступними для спостереження на високих частотах, при цьому роблячи свій вклад у збільшення кількості транзійних сигналів у декаметровому діапазоні.

Також необхідно включити до претендентів на детектування мілісекундні пульсари з гігантськими імпульсами. Через розсіяння в МЗС короткі гігантські імпульси розширюються достатньо для їх виявлення, а відсутність повторення ГІ з такою ж частотою, як і «звичайних» імпульсів (десятки і сотні герц), дозволяють легко виділити імпульсну компоненту на фоні галактичного шуму.

Також не слід виключати з розгляду транзійні сигнали різноманітної природи (що відмінна від випромінювання власне нейтронних зір): від спостереження радіочастотного «відлуння» злиття НЗ до реєстрації

електростатичних розрядів у викидах вулканів близьких екзопланет [117], а також інших джерел невідомої природи як земного, так і космічного походження. Варто зазначити, що це близько до максимальної кількості джерел із унікальними значеннями міри дисперсії. При похибках в $0.006\text{--}0.008\text{ пк/см}^3$ у діапазоні мір дисперсії $0\text{--}30\text{ пк/см}^3$ можна очікувати близько 4000 унікальних об'єктів, при значно більшій їх потенційно детектованій кількості.

Таким чином, можна очікувати до 1000 джерел транзієнтних сигналів різноманітної природи, які можуть бути продетектовані за допомогою найбільшого у світі радіотелескопу декаметрового діапазону. Огляд джерел спорадичного випромінювання потрібно повторювати в майбутньому неодноразово. Напрацьований комплекс програм, методики спостережень та методів обробки роблять ці дослідження ефективними й інформативними, а оскільки мова йде про найближче зоряне оточення, то також, безсумнівно, дуже цінними для астрономії.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

Для аналізу сигналів-кандидатів був розроблений комплекс програм детального аналізу кожного знайденого сигналу, що схожий на космічний. Цей напівавтоматичний комплекс дав змогу відсіяти порядку $2/3$ імпульсів, які виявилися земними завадовими радіосигналами.

Розподіл кількості сигналів, які залишилися в базі даних після усунення завад, за часом детектування від початку сеансу спостережень має досить рівномірний характер. Невеликий максимум на перших годинах спостережень може бути пов'язаний як із невеликою кількістю залишкових завад, так і з іншими причинами (початок спостережень частіше припадав на запис диску Галактики).

Для відокремлення потенційно присутніх серед сигналів-кандидатів таких, які були породжені мерехтіннями або завадами з «дзеркальною» залежністю часової затримки від частоти, був проведений важливий тест: інвертовані в часі записи реальних сигналів оброблялися тими самими програмами пошуку транзієнтів. Були побудовані розподіли сигналів за співвідношенням С/Ш і мірою дисперсії як для сигналів із залежністю, пропорційною f^{-2} , так і з $-f^{-2}$. Останні не схожі на перші ні за інтенсивністю, ні за якісним виглядом гістограм розподілу за мірою дисперсії.

Крім розподілів за мірою дисперсії та співвідношенням С/Ш, були побудовані гістограми розподілів транзієнтів за галактичною широтою. Симетричність гістограм розподілу відносно нульової галактичної широти та той факт, що більше половини подій сконцентровані в інтервалі b ($-30^\circ \dots +30^\circ$), підтверджує гіпотезу належності їх до сигналів космічних джерел.

Таким чином, вся проведена обробка, тести, побудова й аналіз розподілів параметрів знайдених імпульсів свідчать про те, що з високою ймовірністю ці транзієнтні сигнали були породжені джерелами космічного радіовипромінювання, і в Огляді було відкрито велику їх популяцію.

Основні положення цього розділу викладені в публікаціях автора [72, 106, 109–115].

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 продетектованих 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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Cordes J. M. Observational limits on the location of pulsar emission regions / Cordes J. M. // *Astrophysical Journal*. – 1978. – Part 1, vol. 222. – P. 1006-1011.
2. McLaughlin M. A. Transient radio bursts from rotating neutron stars M.A. McLaughlin, A. G. Lyne, D.R. Lorimer [et al.] // *Nature*. – 2006. – Vol. 439. – P. 817–820.
3. Malofeev V. M. Radio emission from AXP and XDINS / Malofeev V.M., Malov O.I., Teplykh D.A. // *Astroph. Space. Sci.* – 2007. – Vol. 308. – P. 211–216.
4. Diehl R. Radioactive ^{26}Al from massive stars in the Galaxy / R. Diehl, H. Halloin, K. Kretschmer [et al.] // *Nature*. – 2006. – Vol. 439. – P. 45–47.
5. Keane E. F. On the birthrates of Galactic neutron stars / Keane E. F. & M. Kramer // *MNRAS*. – 2008. – Vol. 391. – P. 2009-2016.
6. Cordes J. M. Arecibo Pulsar Survey Using ALFA. I. Survey Strategy and First Discoveries / J. M. Cordes, P. Freire., D. R. Lorimer [et al.] // *ApJ*. – 2006. – Vol. 637. – P. 446–455.
7. T. Coenen. The LOFAR pilot surveys for pulsars and fast radio transients / T. Coenen, J. van Leeuwen, J. W. T. Hessels [et al.] // *Astronomy and Astrophysics*. – 2014. – Vol. 570. – P. A60.
8. M. J. Keith. The High Time Resolution Universe Pulsar Survey – I. System configuration and initial discoveries / M. J. Keith, A. Jameson, W. van Straten [et al.] // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2010. – Vol. 409, Issue 2. – P. 619–627.
9. E. Keane. A Cosmic Census of Radio Pulsars with the SKA / E. Keane, B. Bhattacharyya, M. Kramer [et al.] // *Advancing Astrophysics with the Square Kilometre Array*. – 2015. – AASKA14. – p. 40.

10. Konovalenko A. The modern radio astronomy network in Ukraine: UTR-2, URAN and GURT / Konovalenko A., Sodin V., Zakharenko V. [et al.] // *Experimental Astronomy*. – 2016. – Vol. 42. – pp. 11–48.
11. Hewish A. Observation of a rapidly pulsating radio source / A. Hewish, S. J. Bell, J. D. H. Pilkington [et al.] // *Nature*. – 1968. – Vol. 217. – P. 709–713.
12. Захаренко В. В. Спорадическое излучение радиоастрономических источников и его исследование в декаметровом диапазоне / В. В. Захаренко // *Радиофизика и Радиоастрономия*. – 2011. – Т.16. – С. 121–134.
13. Cordes J. M. The Dynamic Radio Sky / J. M. Cordes, J. Lazio, M. A. McLaughlin // *New Astronomy Reviews*. – 2004. – Vol. 48. – P. 1459–1472.
14. Sidorchuk K. M. Search of non-thermal radio emission from planets and stars at decameter wavelength / K. M. Sidorchuk, A. A. Konovalenko, V. N. Melnik [et al.] // *Planetary Radio Emissions VI* [eds. Rucker H. O., Kurth W. S., Mann G.]. Austrian Academy of Sciences Press. – 2006. – Vienna. – P. 83–84.
15. Farrell W. M. On the possibility of coherent cyclotron emission from extrasolar planets / W. M. Farrell, M. D. Desch, P. Zarka // *J. Geophys. Res.* – 1999. – Vol. 104. – P. 14025–14032.
16. Zarka P. Magnetically-Driven Planetary Radio Emissions and Application to Extrasolar Planets / P. Zarka, R. A. Treumann, B. P. Ryabov [et al.] // *Astroph. Space Sci.* – 2001. – Vol. 277. – P. 293–300.
17. Joseph T. The Radiometric Bode's Law and Extrasolar Planets / Joseph T., Lazio W., Farrell W. M. [et al.] // *Astrophys. J.* – 2004. – Vol. 612, No. 1. – P. 511–518.
18. Zakharenko V. Ground-based and spacecraft observations of lightning activity on Saturn / V. Zakharenko, C. Mylostna, A. Konovalenko [et al.] // *Planet. Space Sci.* – 2012. – Vol. 61. – P. 53–59.

19. Shkolnik E. Evidence for Planet-induced Chromospheric Activity on HD 179949 / E. Shkolnik, G. A. H. Walke, D. A. Bohlender // *ApJ*. – 2003. – Vol. 597. – P. 1092–1096.
20. Jackson P. D. Meter-decameter observations of dMe flare stars with the Clark lake Radio telescope / P. D. Jackson, M. R. Kundu, N. Kassim // *Solar Physics*. – 1990. – Vol. 130. – P. 391–398.
21. Richards M. T. Statistical Analysis of 5 Year Continuous Radio Flare Data from beta Persei, V711 Tauri, delta Librae, and UX Arietis / M. T. Richards, E. B. Waltman, F. D. Ghigo [et al.] // *ApJ.Suppl.Ser.* – 2003. – Vol. 147. – P. 337–362.
22. Garcia-Sánchez J. VLA multifrequency observations of RS CVn binaries / J. Garcia-Sánchez, J. M. Paredes, M. Ribo // *Astron. Astrophys.* – 2003. – Vol. 403. – P. 613–624.
23. Camilo F. Transient pulsed radio emission from a magnetar / F. Camilo, S. M. Ransom, J. P. Halpern [et al.] // *Nature*. – 2006. – Vol. 442. – P. 892–895.
24. Voges W. The ROSAT all-sky survey bright source catalogue / W. Voges, B. Aschenbach, Th. Boller [et al.] // *Astron. Astrophys.* – 1999. – Vol. 349. – P. 389–405.
25. Rea N. On the nature of the intermittent pulsar PSR B1931+24 / N. Rea, M. Kramer, L. Stella [et al.] // *MNRAS*. – 2008. – Vol. 391. – P. 663–667.
26. Anne M. Archibald. A Radio Pulsar/X-ray Binary Link / Anne M. Archibald, Ingrid H. Stairs, Scott M. Ransom [et al.] // *Science*. – 2009. – Vol. 324, No. 5933. – P. 1411-1414.
27. Hesse K. H. Pulse intensity histograms of pulsars / K. H. Hesse, R. Wielebinski // *Astron. Astrophys.* – 1974. – Vol. 31. – P. 409–413.
28. Hankins T. H. Nanosecond radio bursts from strong plasma turbulence in the Crab pulsar / T. H. Hankins, J. S. Kern, J. C. Weatherall [et al.] // *Nature*. – 2003. – Vol. 422. – P. 141–143.
29. Hankins T. H. Radio emission signatures in the Crab Pulsar / T. H. Hankins, J. A. Eilek // *ApJ*. – 2007. – Vol. 670. – P. 693–701.

30. Johnston S. Giant pulses from PSR B0540–69 in the Large Magellanic Cloud / S. Johnston, R. W. Romani // *ApJ*. – 2003. – Vol. 590. – P. L95–L98.
31. Ульянов О. М. Обнаружение индивидуальных импульсов пульсаров B0809+74; B0834+06; B0950+08; B0943+10; B1133+16 в декаметровом диапазоне волн / О. М. Ульянов, В. В. Захаренко, А. А. Коноваленко [и др.] // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2006. – Т. 11. – С. 113–133.
32. Ul'yanov, O. M. Energy of anomalously intense pulsar pulses at decameter wavelengths / Ul'yanov, O. M. & Zakharenko, V. V. // *Astron. Rep.* – 2012. – Vol. 56, Issue 6. – P. 417–429.
33. Camilo F. The variable radio-to-x-ray spectrum of the magnetar XTE J1810–197 / F. Camilo, S. M. Ransom, J. Penabaz-Cabré [et al.] // *ApJ*. – 2007. – Vol. 669. – P. 561–569.
34. Kondratiev V. I. New limits on radio emission from x-ray dim isolated neutron stars / V. I. Kondratiev, M. A. McLaughlin, D. R. Lorimer [et al.] // *ApJ*. – 2009. – Vol. 702. – P. 692–706.
35. Waltman E. B. The Evolution of Outbursts in Cygnus X–3 at 2.25 and 8.3 GHz / E. B. Waltman, F. D. Ghigo, K. J. Johnston [et al.] // *AJ*. – 1995. – Vol. 110. – P. 290–299.
36. Fender R. P. Cygnus X–3 in outburst: quenched radio emission, radiation losses and variable local opacity / R. P. Fender, S. J. Bell Burnell, E. B. Waltman [et al.] // *MNRAS*. – 1985. – Vol. 288. – P. 849–858.
37. Cohen R. J. An OH maser outburst in Cepheus A / R. J. Cohen, G. C. Brebner // *MNRAS*. – 1985. – Vol. 216. – P. 51–56.
38. Lainela M. Can shock models explain radio outbursts of active galactic nuclei (AGN) at millimeter and centimeter wavelengths? / M. Lainela // *Astron. Astrophys.* – 1994. – Vol. 286. – P. 408–414.
39. Falcke H. Detection and imaging of atmospheric radio flashes from cosmic ray air showers / H. Falcke, W. D. Apel, A. F. Badea [et al.] // *Nature*. – 1996. – Vol. 435. – P. 313–316.

40. Hankins T. H. A search for lunar radio Cherenkov emission from high-energy neutrinos / T. H. Hankins, R. D. Ekers, J. D. O'Sullivan // MNRAS. – 1996. – Vol. 283. – P. 1027–1030.
41. Colgate S. A. Coherent Emission from Expanding Supernova Shells / S.A. Colgate, P. D. Noerdlinger // ApJ. – 1971. – Vol. 165. – P. 509–522.
42. Usov V. V. Low frequency radio pulses from gamma-ray bursts? / V. V. Usov, J. I. Katz // Astron. Astrophys. – 2000. – Vol. 364. – P.655–659.
43. Frail D. A. The radio afterglow from the γ -ray burst of 8 May 1997 / D. A. Frail, S. R. Kulkarni, L. Nicastro [et al.] // Nature. – 1997. – Vol. 389. – P.261–263.
44. Hansen B. M. S. Radio and X-ray signatures of merging neutron stars / B. M. S. Hansen, M. Lyutikov // MNRAS. – 2001. – Vol. 322. – P.695–701.
45. Abbott, B. P. Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger / Abbott, B. P.; Abbott, R.; Abbott, T. D. [et al.]. // The ApJL. – 2017. – Vol. 848, Issue 2 – article id. L12. – 59 pp.
46. Rees M. J. A better way of searching for black-hole explosions? / M. J. Rees // Nature. – 1977. – Vol. 266. – P. 333–334.
47. Lorimer D. R. A bright millisecond radio burst of extragalactic origin / D. R. Lorimer, M. Bailes, M. A. McLaughlin [et al.] // Science. – 2007. – Vol. 318. – P. 777–780.
48. Cordes J. M. NE2001.I. A new model for the galactic distribution of free electrons and its fluctuations / J. M. Cordes, T. J. W. Lazio // ArXiv Astrophysics e-prints. – 2002.
49. E. Petroff. FRBCAT: The Fast Radio Burst Catalogue / E. Petroff, E. D. Barr, A. Jameson [et al.] // Publications of the Astronomical Society of Australia. – 2016. – Vol. 33, id.e045 – 7 pp.
50. Petrova S. A. On the origin of giant pulses in radio pulsars / S. A. Petrova // Astron. Astrophys. – 2004. – Vol. 424. – P.227–236.
51. Cordes J. M. Searches for fast radio transients / J. M. Cordes, M. A. McLaughlin // ApJ. – 2003. – Vol. 596. – P. 1142–1154.

52. N. T. Palliyaguru. Radio properties of rotating radio transients – I. Searches for periodicities and randomness in pulse arrival times / N. T. Palliyaguru, M. A. McLaughlin, E. F. Keane [et al.] // MNRAS. – 2011. – Vol. 417, Issue 3. – P. 1871–1880.
53. Keane E. F. Rotating Radio Transients: new discoveries, timing solutions and musings / E. F. Keane, M. Kramer, A. G. Lyne [et al.] // MNRAS. – 2011. – Vol. 415. – P. 3065–3080.
54. S. Burke-Spolaor. The millisecond radio sky: transients from a blind single-pulse search / S. Burke-Spolaor & M. Bailes // MNRAS. – 2010. – Vol. 402, Issue 2. – P. 855–866.
55. Karako-Argaman, C. Discoveries of Rotating Radio Transients in the 350 MHz Green Bank Telescope Drift-scan Survey / Karako-Argaman, C. // Proceedings of the International Astronomical Union. – 2012. – 8 (S291), 107–110. doi:10.1017/S1743921312023290.
56. M. E. Bell. A survey for transients and variables with the Murchison Widefield Array 32-tile prototype at 154 MHz / M. E. Bell, T. Murphy, D. L. Kaplan [et al.] // MNRAS. – 2014. – Vol. 438, Issue 1. – P. 352–367.
57. A. Rowlinson. Limits on Fast Radio Bursts and other transient sources at 182 MHz using the Murchison Widefield Array / A. Rowlinson, M. E. Bell, T. Murphy [et al.] // MNRAS. – 2016. – Vol. 458, Issue 4. – P. 3506–3522.
58. C. Karako-Argaman. Discovery and Follow-up of Rotating Radio Transients with the Green Bank and LOFAR Telescopes / C. Karako-Argaman, V. M. Kaspi, R. S. Lynch [et al.] // ApJ. – 2015. – Vol. 809. – P. 67.
59. K. Stovall. PULSAR OBSERVATIONS USING THE FIRST STATION OF THE LONG WAVELENGTH ARRAY AND THE LWA PULSAR DATA ARCHIVE / K. Stovall, P. S. Ray, J. Blythe [et al.]. // ApJ. – 2015. – Vol. 808, No. 2. – 19 pp. doi:10.1088/0004-637X/808/2/156
60. V. V. Zakharenko. Detection of decametre-wavelength pulsed radio emission of 40 known pulsars / V. V. Zakharenko, I. Y. Vasylieva, A. A. Konovalenko [et al.] // MNRAS. – 2013. – Vol. 431, No. 1. – P. 3624–3641.

61. Manchester R. N. The Australia Telescope National Facility Pulsar. Catalogue / R. N. Manchester, G. B. Hobbs, A. Teoh [et al.] // AJ. – 2005. – Vol. 129. – P. 1993–2006.
62. G. B. Taylor. OBSERVATIONS OF ROTATING RADIO TRANSIENTS WITH THE FIRST STATION OF THE LONG WAVELENGTH ARRAY / G. B. Taylor, K. Stovall, M. McCrackan [et al.] // ApJ – 2016. – Vol. 831, No. 2, article id. 140. – 7 pp.
63. V. I. Kondratiev. A LOFAR census of millisecond pulsars / V. I. Kondratiev, J. P. W. Verbiest, J. W. T. Hessels [et al.] // A&A. – 2016. – Vol. 585, id.A128. – 27 pp. DOI: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201527178>
64. A. V. Bilous. A LOFAR census of non-recycled pulsars: average profiles, dispersion measures, flux densities, and spectra / A. V. Bilous, V. I. Kondratiev, M. Kramer [et al.] // A&A. – 2016. – Vol. 591, id.A134. – 34 pp. DOI: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201527702>
65. Tara Murphy. A search for long-time-scale, low-frequency radio transients / Tara Murphy, David L. Kaplan, Steve Croft [et al.] // MNRAS. – 2017. – Vol. 466, Issue 2. – P. 1944–1953
66. Брук Ю. М. Наблюдение радиоизлучения пульсара NP 0532 на частоте 25 МГц / Ю. М. Брук // Изв. ВУЗ., Радиофизика. – 1970. – Т. 13, – С. 1818–1826.
67. Bruck Yu. M. Decametric Pulse Radioemission from PSR 0809, PSR 1133, and PSR 1919 / Yu. M. Bruck, B. Yu. Ustimenko // Nature. – 1973. – Vol. 242. – P. 58–59.
68. Bruck Yu. M. Decametric radio emission from four pulsars / Yu. M. Bruck, B. Yu. Ustimenko // Nature. – 1976. – Vol. 260. – P. 766–767.
69. Popov M. V. Instantaneous Radio Spectra of Giant Pulses from the Crab Pulsar from Decimeter to Decameter Wavelengths / Popov M. V., Kuz'min A. D., Ul'yanov O. M. [et al.] // Astron. Rep. – 2006. – Vol. 50, No. 7. – P. 562–568.
70. Ul'yanov O. M. The Parameters of Pulsar Subpulse Emission at Decameter Wavelengths / Ul'yanov O. M., Zakharenko V. V., and Bruck Yu. M. // Astron. Rep. – 2008. – Vol. 52, No. 11. – P. 917–924.

71. I. P. Kravtsov. Decameter survey of pulsars and transients of the Northern Sky. Current status / I. P. Kravtsov, V. V. Zakharenko, I. Y. Vasylieva [et al.] // 23rd Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics (YSC 2016), April 25–30, 2016, abstract. – Kyiv, 2016.
72. V. V. Zakharenko. Pulsar Discovering Jubilee. 50 Years of Transient Investigation Era / V. V. Zakharenko, I. P. Kravtsov, Ia. Y. Vasylieva // 17-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School: “Astronomy and Beyond: Astrophysics, Cosmology, Cosmomicrophysics, Astroparticle Physics, Radioastronomy and Astrobiology”, August 13-20, 2017: abstract. – Odesa, 2017.
73. Bates S. D. A 6.5-GHz Multibeam Pulsar Survey / S. D. Bates, S. Johnston, D. R. Lorimer [et al.] // MNRAS. – 2011. – Vol. 411. – P. 1575–1584.
74. Захаренко В. В. Поиск импульсного излучения рентгеновских радиотихих одиночных нейтронных звезд в декаметровом диапазоне / В. В. Захаренко, А. В. Маркова, Я. Ю. Васильева // Радиофизика и Радиоастрономия. – 2010. – Т. 15. – С. 263–270.
75. Kravtsov I. P. Search for non-impulse decameter radiation of PSR B0809+74 / I. P. Kravtsov, V.V. Zakharenko // 14th Kharkiv Young Scientist Conference on Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics, October 14 – 17, 2014: abstract. – Kharkiv, 2014. – CD-ROM, RAA-7.
76. Thorsett S. Frequency dependence of pulsar integrated profiles / S. Thorsett // ApJ. – 1991. – Vol. 377. – P. 263–267.
77. S. I. Braude. Decametric survey of discrete sources in the Northern sky. I – The UTR-2 radio telescope: Experimental techniques and data processing / S. I. Braude, A. V. Megn, B. P. Riabov [et al.] // Astrophysics and space science. – 1978. – Vol. 54. – P. 3–36.
78. S. Y. Braude. Decametric survey of discrete sources in the northern sky / S. Y. Braude, S. L. Rashkovsky, K. M. Sidorchuk, [et al.] // Astrophysics and space science. – 2002. – Vol. 280. – P. 235–300.

79. Manchester R. N. The Second Molonglo Pulsar Survey – Discovery of 155 Pulsars / R. N. Manchester, A. G. Lyne, J. H. Taylor [et al.] // MNRAS. – 1978. – Vol. 185. – P. 409–421.
80. Manchester R. N. The Parkes Southern Pulsar Survey I. Observing and data analysis systems and initial results / R. N. Manchester, A. G. Lyne, N. D'Amico [et al.] // MNRAS. – 1996. – Vol. 279. – P. 1235–1250.
81. Foster R. S. A High Galactic Latitude Pulsar Survey of the Arecibo Sky / R. S. Foster, B.J. Cadwell, A. Wolszczan [et al.] // ApJ. – 1995. – Vol. 454. – P. 826–830.
82. Cordes J. M. Arecibo Pulsar Survey Using ALFA. I. Survey Strategy and First Discoveries / Cordes J. M., Freire P. C. C., Lorimer D. R. [et al.]. // Astrophys. J. – 2006. – Vol. 637, No. 1. – P. 446-455.
83. GBT 350-MHz Drift Scan Pulsar Survey.
<http://www.as.wvu.edu/~pulsar/GBTdrift350/>
84. Брауде С. Я. Радиотелескоп декаметрового диапазона волн УТР-2 / С. Я. Брауде, А. В. Мень., Л. Г. Содин // М.: Связь– сборник Антенны. – 1978.– N. 26. – С. 3–14.
85. Hankins T. H. Pulsar signal processing / T. H. Hankins, B. J. Rickett // Methods in Computational Physics. Volume 14 – Radio astronomy. — 1975. — Vol. 14. — P. 55–129.
86. I. Y. Vasylieva. Decameter pulsar/transient survey of northern sky. First results / I. Y. Vasylieva, V. V. Zakharenko, A. A. Konovalenko [et al.] // Radio physics and Radio astronomy. – 2014. – Vol. 19, Issue 3. – P. 197-205.
87. Sidorchuk M. A. Large-scale structure of the northern sky at decametric waves / M. A. Sidorchuk, O. M. Ulyanov, D. V. Shepelev V. A. and Mukha [et al.] // Scientific Workshop – Astrophysics with E-LOFAR. — 2008.
88. VASYLIEVA, I. Y., 2015. Pulsars and transients survey, and exoplanet search at low-frequencies with the UTR-2 radio telescope: methods and first results [online]. Phd Thesis ed. Observatoire de Paris [viewed 19 April 2018]. Available from: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01246634>.

89. J. W. T. Hessels. The GBT350 Survey of the Northern Galactic Plane for Radio Pulsars and Transients / J. W. T. Hessels, S. M. Ransom, V. M. Kaspi, [et al.] // In C. Bassa, Z. Wang, A. Cumming and V. M. Kaspi, editors, 40 Years of Pulsars: Millisecond Pulsars, Magnetars and More, American Institute of Physics Conference Series. – 2008. – Vol. 983. – P. 613–615.
90. Vyacheslav Zakharenko. Using of Pulsar Spectra Catalogue at Frequencies Below 80 MHz for Astronomical Calibration of Phased Antenna Arrays / Vyacheslav Zakharenko, Serge Yerin, Igor Bubnov [et al.] // 2016 International Young Scientists Forum on Applied Physics (YSF), October 10–14, 2016: conference paper. – Kharkiv, 2016, RAA-5 (DOI: 10.1109/YSF.2016.7753839).
91. Zakharenko V. Digital Receivers for Low-Frequency Radio Telescopes UTR-2, URAN, GURT / Zakharenko V., Konovalenko A., Zarka P. [et al.] // Journal of Astronomical Instrumentation. – Mar. 2016. – Vol. 5. – Pp. 1641010 – 738.
92. Vasylieva I. Y., Data Processing Pipeline for Decameter Pulsar/Transient Survey / Vasylieva I. Y. , Zakharenko V. V., Zarka P. [et al.] // Odessa Astronomical Publications. – 2013. – Vol. 26. – P. 159.
93. E. Petroff. Identifying the source of perytons at the Parkes radio telescope / E. Petroff, E. F. Keane, E. D. Barr [et al.] // MNRAS. – 2015. – Vol. 451. – P. 3933–3940.
94. Yogesh Maan. DISCOVERY OF LOW DM FAST RADIO TRANSIENTS: GEMINGA PULSAR CAUGHT IN THE ACT / Yogesh Maan // The Astrophysical Journal. – Vol. 815, Number 2 – 11 pp. doi:10.1088/0004-637X/815/2/126
95. P. A. Fridman. RFI mitigation methods in radio astronomy / P. A. Fridman and W. A. Baan // Astronomy and Astrophysics. – 2001. – Vol. 378, no. 1. – pages 327–344.
96. A. R. Offringa. Post-correlation radio frequency interference classification Methods / A. R. Offringa, A. G. de Bruyn, M. Biehl, [et al.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2010. – Vol. 405, No. 1. – pages 155–167.

97. A. R. Offringa. Algorithms for Radio Interference Detection and Removal. PhD thesis, <http://andreoffringa.org/pdfs/thesis/thesisaroffringa.pdf>, 2012.
98. E. S. Page. Continuous inspection schemes / E. S. Page // *Biometrika*. – 1954. – Vol. 41, No. 1. – pp. 100–115.
99. M. Basseville. Detection of Abrupt Changes / M. Basseville and I. Nikiforov // *Theory and Application*. – 1993. – pp. 1–469.
100. Скорик А. А. Тонкая структура аномально интенсивных импульсов пульсара J0814+7429 в декаметровом диапазоне / Скорик А. А., Ульянов О. М., Захаренко В. В. [и др.] // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2017. – Т. 22. – No. 2. – С. 93–111.
101. Skoryk A. O. Fine structure of the pulsar decameter radiation as the probe of the propagation media / A. O. Skoryk, O. M. Ulyanov, V. V. Zakharenko [et al.] // *International Young Scientists Forum on Applied Physics (YSF)*, 29 September – 2 October 2015: abstract. – Dnipro, 2015. – CD-ROM.
102. Shevtsova A. I. Rotation Measure Calculation Algorithm for Pulse Radiation in Decameter Range / Shevtsova A. I., Ulyanov O. M., Skoryk A. O. [et al.] // *International Young Scientists Forum on Applied Physics (YSF)*, September 29 – October 2, 2015: abstract. – Dnipro. – CD-ROM., RAA-9 (DOI: 10.1109/YSF.2015.7333262).
103. A. O. Skoryk. Fine structure of the PSR B0809+74 individual pulses in decameter wave range / A. O. Skoryk, O. M. Ulyanov, V. V. Zakharenko [et al.] // 2016 *International Young Scientists Forum on Applied Physics (YSF)*, October 10–14, 2016: abstract. – Kharkiv, 2016. – CD-ROM.
104. D. C. Backer. Temporal variations of pulsar dispersion measures / D. C. Backer, S. Hama, S. V. Hook and R. S. Foster // *ApJ*. – 1993. – Vol. 404, No. 1 – P. 636.
105. V. M. Tkachov. Using grid technologies for solving problems in radio physics and radio astronomy / V. M. Tkachov, V. V. Zakharenko, Ia. Yu. Vasylieva [et al.] // *Radio Physics and Radio Astronomy (in Russian)*. – 2013. – Vol. 18, No. 2. – p. 176-188.

106. Zakharenko V. V. Decameter Pulsars and Transients Survey of the Northern Sky. Status, First Results, Multiparametric Pipeline for Candidate Selection / Zakharenko V. V., Kravtsov I. P., Vasylieva I. Y. [et al.] // *Odessa Astronomical Publications*. – 2015. – Vol. 28, №2. – P. 252–255.
107. I. P. Kravtsov. The first results of transient signal processing in Decameter pulsar/transient Survey of northern sky / V. V. Zakharenko, I. P. Kravtsov, I. Y. Vasylieva [et al.] // 15-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School: “Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology, Cosmomicrophysics, Astroparticle Physics, Radioastronomy and Astrobiology”, August 16–23, 2015: abstract. – Odesa, 2015.
108. I. P. Kravtsov. Decameter Pulsars and Transients Survey of the Northern Sky. Observations and Data Processing / I. P. Kravtsov, V. V. Zakharenko, I. Y. Vasylieva [et al.] // 9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves MSMW'2016, June 21-24, 2016: conference paper. – Kharkiv, 2016, DOI: 10.1109/MSMW.2016.7538020.
109. I. P. Kravtsov. Search for Transient Signals in the Data of Decameter Survey of Northern Sky / I. P. Kravtsov, V. V. Zakharenko, I. Y. Vasylieva [et al.] // *Advances in Astronomy and Space Physics*. – 2016. – Vol. 6, Issue 2. – P. 79–84.
110. В. В. Захаренко. Декаметровый обзор Северного неба с целью поиска пульсаров и источников транзиентного излучения. Параметры индивидуальных импульсов / В. В. Захаренко, И. П. Кравцов, Я. Ю. Васильева // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2017. – Т. 22. – No. 1. – С. 31–44.
111. Zakharenko V. V. Decameter Pulsar/Transient Survey of Northern Sky. Multiparametric Pipeline Candidate Selection / Zakharenko V. V., Kravtsov I. P., Vasylieva I. Y. [et al.] // International Young Scientists Forum on Applied Physics (YSF), September 29 – October 2, 2015: abstract. – Dnipro, 2015. – CD-ROM, RAA-8 (DOI: 10.1109/YSF.2015.7333261).

112. I. P. Kravtsov. Data Processing of the Low Frequency Pulsars and Transients Survey of the Northern Sky / I. P. Kravtsov, V. V. Zakharenko, I. Y. Vasylieva [et al.] // 2016 International Young Scientists Forum on Applied Physics (YSF), October 10–14, 2016 : abstract. – Kharkiv, 2016. – CD-ROM, RAA-6.
113. I. P. Kravtsov. Analysis of the Transient Signals in Decameter Survey of the Northern Sky / I. P. Kravtsov, V. V. Zakharenko, I. Y. Vasylieva [et al.] // 2017 IEEE INTERNATIONAL YOUNG SCIENTISTS FORUM ON APPLIED PHYSICS AND ENGINEERING YSF-2017, October 17–20, 2017: abstract. – Lviv, 2017. – CD-ROM, MWA-7.
114. Kravtsov I. P. Parameters of the Transient Signals Detected in the Decameter Survey of the Northern Sky / Kravtsov I. P., Zakharenko V. V., Vasylieva I. Y. [et al.] // Odessa Astronomical Publications. – 2016. – Vol. 29. – P. 179.
115. I. P. Kravtsov. Parameters of the Transient Signals Detected in the Decameter Survey of the Northern Sky / I. P. Kravtsov, V. V. Zakharenko, I. Y. Vasylieva [et al.] // 16-th Odesa International Astronomical Gamow Conference-School “ASTRONOMY AND BEYOND: ASTROPHYSICS, COSMOLOGY, COSMOMICROPHYSICS, ASTROPARTICLE PHYSICS, RADIOASTRONOMY AND ASTROBIOLOGY”, August 14–20, 2016: abstract. – Odesa. 2016.
116. <http://astro.phys.wvu.edu/rratalog/>
117. Hodosán G. Exo-lightning radio emission: the case study of HAT-P-11b / Hodosán G., Helling C., Rimmer P.B. // 2017. – arXiv:1711.08053.

ДОДАТОК А

Наукові праці, в яких опубліковані основні результати 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. Miroshnichenko, 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).*

ДОДАТОК Б

Список публікацій, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації (тези доповідей на наукових конференціях)

1. **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).*
2. 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).*
3. 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).*
4. 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).*

5. 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).*

6. 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).*

7. **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).*

8. **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).*
9. 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).*
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 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).*
11. **I. P. Kravtsov**, V. V. Zakharenko, I. Y. Vasylieva, 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).

12. V. V. Zakharenko, **I. P. Kravtsov**, Ia. Y. Vasylieva. 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*).

13. **I. P. Kravtsov**, V. V. Zakharenko, I. Y. Vasylieva, 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*).

ДОДАТОК В

База даних, що містить параметри знайдених транзієнтних сигналів (див. опис у Розділі 3)

Number of the signal	Time_from_start	RA	dec	DM	SNR	DM_corr	SNR_corr
1	41788,1	21,45	-8,78	3,9100	6,01	3,9140	8,1
2	38707,4	8,24	-0,47	10,2900	6,80	10,2900	8,1
3	17263,2	2,41	3,55	11,2500	6,12	11,2500	8,1
4	8603,46	10,08	4,67	11,3600	6,54	11,3620	8,1
5	5351,04	23,24	7,22	1,8100	6,38	1,8080	8,1
6	31343	6,46	7,74	4,6000	6,14	4,6000	8,1
7	22075,2	3,95	9,23	22,2300	6,57	22,2300	8,1
8	19588,5	16,35	17,03	27,1400	6,18	27,1380	8,1
9	40578,3	22,18	17,50	4,9500	6,24	4,9540	8,1
10	4277,78	12,10	18,42	2,4200	6,15	2,4220	8,1
11	12601,3	10,19	18,75	26,2100	6,33	26,2080	8,1
12	33544,6	21,02	58,19	5,3100	6,20	5,3120	8,1
13	1056,39	7,71	67,12	25,9400	6,14	25,9400	8,1
14	3095,01	8,28	67,12	27,2900	6,03	27,2840	8,1
15	39803,5	18,48	67,94	3,9300	6,14	3,9280	8,1
16	12979,5	12,70	70,34	9,8300	6,02	9,8380	8,1
17	24266,6	15,84	70,76	13,0700	6,02	13,0700	8,1
18	14202,9	1,17	-9,66	14,9800	6,03	14,9780	8,2
19	36912,1	7,74	-1,70	7,9600	6,68	7,9520	8,2
20	35314,9	7,43	2,98	7,9900	6,24	7,9860	8,2
21	29863,3	6,11	9,23	17,1600	6,40	17,1600	8,2
22	16193,2	2,31	10,25	8,7200	6,25	8,7140	8,2
23	28270,3	15,88	24,85	10,4800	6,04	10,4820	8,2
24	36931	4,95	28,92	11,1500	6,08	11,1480	8,2
25	29269,7	2,96	32,99	5,8700	6,23	5,8740	8,2
26	12447	0,68	-9,66	20,8400	6,04	20,8360	8,3
27	7141,25	23,27	-8,27	16,9800	6,22	16,9820	8,3
28	1958,8	22,16	1,24	12,5900	6,13	12,5900	8,3
29	1458,2	22,35	15,55	14,3600	6,38	14,3580	8,3
30	18861,9	23,67	22,24	21,6400	6,28	21,6400	8,3
31	31975,4	3,84	35,31	20,2000	6,14	20,2020	8,3
32	2077,48	11,14	52,73	15,7700	6,07	15,7620	8,3
33	13486,5	0,97	-12,04	22,3800	6,15	22,3860	8,4
34	2613	22,02	-6,12	12,6800	6,23	12,6780	8,4

База даних. Продовження

35	38513,7	20,54	10,31	15,9800	6,45	15,9800	8,4
36	14619,6	11,48	66,71	26,8600	6,00	26,8580	8,4
37	36881	17,67	66,71	12,4000	6,13	12,4140	8,4
38	40955	18,67	-10,47	5,1900	6,07	5,1900	8,5
39	9095,03	23,75	-10,44	17,0700	6,29	17,0700	8,5
40	43036,4	9,18	-8,90	15,7200	6,09	15,7100	8,5
41	42443,3	9,28	0,74	15,0900	6,04	15,0840	8,5
42	17561,2	12,50	3,63	13,3700	5,71	13,3700	8,5
43	383,286	21,79	4,03	4,6800	6,01	4,6820	8,5
44	31352	6,46	6,68	21,6200	6,28	21,6200	8,5
45	13838,6	1,59	8,79	4,3600	6,42	4,3600	8,5
46	11282,9	0,95	9,74	14,6500	6,38	14,6540	8,5
47	21702,1	3,84	9,74	22,2800	6,14	22,2780	8,5
48	13528,2	1,71	15,08	13,1500	6,03	13,1500	8,5
49	7127,07	23,93	16,02	14,8700	6,07	14,8700	8,5
50	7101,88	12,89	16,57	14,6600	6,03	14,6600	8,5
51	2964,62	11,74	17,03	17,5500	6,18	17,5460	8,5
52	21053,1	12,54	18,75	6,4200	6,08	6,4240	8,5
53	27329,3	14,28	18,75	14,3400	6,03	14,3400	8,5
54	6059,74	20,12	22,68	5,2500	6,22	5,2560	8,5
55	32910,9	15,48	26,04	12,0400	6,09	12,0400	8,5
56	28436,9	2,60	29,34	5,0000	6,15	4,9980	8,5
57	23552,5	13,01	31,02	10,9000	6,26	10,9020	8,5
58	11930	22,27	35,31	3,5300	6,18	3,5280	8,5
59	16888,1	23,72	37,72	21,4400	6,31	21,4400	8,5
60	5912,29	8,14	42,35	7,5300	5,89	7,5280	8,5
61	4862,94	11,78	48,92	10,1200	6,84	10,1280	8,5
62	29234,4	18,55	49,71	5,3300	6,61	5,3320	8,5
63	5761,27	12,23	55,42	6,2700	6,77	6,2780	8,5
64	19641,1	17,15	57,80	11,5600	6,44	11,5600	8,5
65	11658,6	10,66	67,12	3,8600	6,19	3,8580	8,5
66	14005,1	11,31	67,94	7,6900	6,09	7,6800	8,5
67	7498,11	21,34	68,23	12,7200	6,12	12,7240	8,5
68	15209,2	23,48	69,06	25,4000	6,11	25,4000	8,5
69	11955,2	12,42	70,34	10,9900	6,30	11,0040	8,5
70	19317,5	14,46	70,34	13,3100	6,01	13,3040	8,5
71	4891,32	9,52	72,43	15,7600	6,08	15,7600	8,5
72	481,845	7,49	-6,85	13,2800	6,13	13,2800	8,6
73	40887,4	8,71	-3,53	22,2200	6,19	22,2180	8,6

База даних. Продовження

74	23410,9	3,86	-2,24	23,8500	6,06	23,8500	8,6
75	44778,1	10,06	2,41	17,6500	6,02	17,6440	8,6
76	25366,1	4,99	14,60	8,1000	6,25	8,1000	8,6
77	14233,8	14,87	17,03	19,9200	6,39	19,9260	8,6
78	14735,5	15,01	17,50	13,4100	6,12	13,4040	8,6
79	34700	3,94	19,63	15,0700	6,04	15,0700	8,6
80	7050,09	20,65	29,34	17,8800	6,98	17,8700	8,6
81	35172,2	4,47	29,75	7,3900	6,21	7,3840	8,6
82	38798,2	17,41	46,23	16,7300	6,14	16,7420	8,6
83	3401,58	22,17	-11,23	6,7100	6,02	6,7040	8,7
84	9953,08	23,99	-10,44	24,2600	6,06	24 ,26	8,7
85	3790,48	22,34	-5,43	19,2300	6,09	19,2340	8,7
86	22836,1	3,63	-5,43	9,9700	6,50	9,9680	8,7
87	31276,1	6,18	0,74	27,0100	6,02	27,0080	8,7
88	7683,57	0,15	16,42	12,1600	6,11	12,1620	8,7
89	14761,6	15,01	16,57	11,2600	6,38	11,2580	8,7
90	3484,62	11,88	18,42	14,8700	6,24	14,8700	8,7
91	25579,5	13,79	20,55	17,5700	6,17	17,5680	8,7
92	5930,13	12,27	55,42	5,8000	5,51	5,5840	8,7
93	16095,5	23,73	68,65	23,0200	6,00	23,0200	8,7
94	32498,7	18,13	70,76	24,2300	6,36	24,2200	8,7
95	5625,42	9,72	74,14	17,8300	6,12	17,8300	8,7
96	29903,1	18,15	-11,92	4,9100	6,18	4,9100	8,8
97	4445,54	11,08	-8,78	1,8900	6,23	1,8900	8,8
98	40240,2	18,47	-8,19	13,2600	6,15	13,2600	8,8
99	44826,5	9,74	-5,43	18,9500	6,28	18,9580	8,8
100	28466,7	14,41	41,16	2,8200	6,57	2,8200	8,8
101	2037,73	8,72	72,43	12,7900	6,24	12,7900	8,8
102	14986,7	14,01	-11,92	20,2800	6,36	20,2840	9
103	26575,6	17,23	-11,92	15,1300	6,33	15,1300	9
104	18909,1	12,55	-10,47	20,5400	6,09	20,5420	9
105	41036	8,69	-8,27	18,3400	6,08	18,3460	9
106	7480,46	23,37	-7,54	25,2600	6,36	25,2640	9
107	12482,9	0,76	-7,54	11,6600	6,07	11,6620	9
108	11955,8	0,61	-6,12	19,0800	6,49	19,0800	9
109	8830,74	23,81	-3,53	4,6400	6,03	4,6420	9
110	11081,5	10,70	3,63	14,6200	5,73	14,6280	9
111	28198,2	18,75	16,57	19,0100	6,42	19,0080	9
112	20684,2	16,66	17,50	4,4300	6,10	4,4300	9

База даних. Продовження

113	26896,7	14,16	18,75	11,4600	6,04	11,4600	9
114	10232	21,14	19,63	2,5400	6,04	2,5400	9
115	11703,4	21,62	20,01	13,3100	6,75	13,3080	9
116	42126,5	6,13	22,68	14,9500	6,10	14,9500	9
117	12832,4	22,00	23,12	20,8900	6,07	20,8880	9
118	42173	6,15	23,12	5,9000	5,56	5,9040	9
119	17007,3	23,31	23,93	8,8200	6,13	8,8200	9
120	38618,3	17,07	25,18	15,3600	6,52	15,3620	9
121	6345,78	20,39	28,14	13,8300	6,19	13,8280	9
122	42368,2	6,47	29,34	6,0300	6,55	6,0300	9
123	32622	15,53	29,36	8,1800	6,27	8,1880	9
124	11989,8	22,09	30,94	5,8900	6,41	5,8900	9
125	14404,1	22,76	30,94	11,0900	6,50	11,0900	9
126	24679,7	1,62	30,94	9,2400	6,22	9,2400	9
127	55056,6	14,21	31,29	13,1200	6,30	13,1240	9
128	31173,3	3,69	36,92	9,3900	6,17	9,3900	9
129	9059,17	20,85	39,22	15,7400	6,13	15,7400	9
130	32221,2	3,29	40,41	17,8000	6,16	17,7900	9
131	1757,54	11,05	53,91	12,1800	6,51	12,1760	9
132	14722,8	15,79	57,40	13,7300	6,52	13,7300	9
133	1676,91	19,72	68,23	18,1700	6,01	18,1720	9
134	22849,4	3,83	-0,47	26,6500	6,11	26,6460	9,1
135	3364,98	22,55	1,24	22,7400	6,32	22,7380	9,1
136	1534,58	22,44	16,89	11,4200	6,22	11,4180	9,1
137	34178,9	6,85	-2,24	22,5200	6,02	22,5260	9,2
138	17382,3	23,46	28,14	13,9900	6,20	13,9880	9,2
139	5253,39	7,96	41,96	5,2400	6,05	5,2380	9,2
140	35750,9	7,22	-8,27	10,5900	6,37	10,5900	9,3
141	14977,5	2,11	14,12	24,0100	6,32	24,0100	9,3
142	41944,9	6,28	27,30	6,5800	6,02	6,5740	9,3
143	9839,02	21,07	39,62	22,7700	6,50	22,7600	9,3
144	412,241	18,45	40,01	11,2000	6,03	11,2000	9,3
145	4639,61	8,58	-8,94	11,8500	6,05	11,8500	9,4
146	24677,7	17,77	17,50	2,5000	6,03	2,4980	9,4
147	42370,5	9,06	-6,82	17,9600	6,64	17,9580	9,5
148	30437,9	6,14	6,22	12,3400	6,81	12,3400	9,5
149	33486,1	7,05	7,74	16,7800	6,06	16,7800	9,5
150	42455,9	9,61	10,75	19,1700	7,21	19,1700	9,5
151	13507,9	14,67	16,57	17,1200	6,05	17,1220	9,5

База даних. Продовження

152	26311,5	18,22	17,96	10,9600	6,09	10,9540	9,5
153	3667,7	7,71	18,75	21,8200	6,21	21,8220	9,5
154	31093,3	3,33	29,75	17,3600	6,35	17,3600	9,5
155	15071,2	23,15	34,91	6,0800	6,07	6,0860	9,5
156	37718,5	5,44	35,31	16,1100	6,09	16,1100	9,5
157	16907,7	13,79	70,76	26,9100	6,20	26,9100	9,5
158	33924,5	16,72	-8,94	7,8500	6,42	7,8500	9,6
159	42451,4	21,64	-8,78	26,8600	6,10	26,8620	9,7
160	21987,8	3,92	10,25	7,9000	6,05	7,9020	9,7
161	1731,82	18,85	21,36	9,6300	6,29	9,6300	9,7
162	11344	11,31	72,86	16,9400	6,32	16,9400	9,7
163	25660,9	4,35	-12,04	26,5200	6,11	26,5180	9,8
164	36883,3	7,47	-11,23	25,9200	6,92	25,9120	9,8
165	19992,3	2,91	-4,85	26,7500	6,02	26,7480	9,8
166	19799,6	3,18	6,22	11,1000	6,25	11,1020	9,8
167	27000,8	1,67	8,32	10,1100	6,75	10,1080	9,8
168	11414,2	1,05	12,25	14,9900	6,49	14,9900	9,8
169	1407,65	8,42	24,41	16,7400	6,11	16,7500	9,8
170	7134,13	9,40	67,94	9,3500	6,12	9,3500	9,8
171	12479,5	21,83	20,46	17,8800	6,05	18,8800	9,9
172	8615,93	12,24	-10,31	19,5400	6,12	19,5400	10
173	27962,3	17,61	-10,31	13,3400	6,00	13,3420	10
174	13139,3	10,95	-8,94	6,6300	6,14	6,6300	10
175	45365	19,96	-7,57	23,8300	6,14	23,8280	10
176	23207,6	3,74	-6,82	15,5400	6,05	15,5400	10
177	37762,6	8,11	3,55	12,5600	6,14	12,5520	10
178	3820,24	22,75	4,59	15,4700	6,25	15,4720	10
179	14054,6	11,59	6,31	4,8400	7,82	4,8460	10
180	22426	3,98	6,68	12,0000	6,07	12,0040	10
181	43315,3	9,78	7,22	7,1200	6,23	7,1200	10
182	6720,27	23,75	12,25	15,2800	6,11	15,2800	10
183	14452,9	1,96	15,08	17,5700	6,32	17,5700	10
184	29070,2	18,99	17,03	12,5800	6,48	12,5800	10
185	9607,55	13,58	17,50	18,9800	6,15	18,9780	10
186	6928,55	12,84	18,42	10,4100	6,07	10,4180	10
187	8941,61	9,17	20,11	20,5100	6,19	20,5100	10
188	31155,6	3,02	20,46	16,9400	6,56	16,9400	10
189	28597,6	2,38	21,80	12,4100	6,21	12,4100	10
190	33096,6	3,82	28,14	9,6200	6,22	9,6220	10

База даних. Продовження

191	28299,5	2,56	28,92	6,8900	6,03	6,8920	10
192	3545,87	19,68	29,75	10,2600	6,34	20,2600	10
193	33345,6	4,09	32,17	6,4500	6,47	6,4520	10
194	19689,1	0,43	35,31	4,1500	6,39	4,1560	10
195	4243,48	20,14	35,72	14,0800	7,95	14,0780	10
196	43861,4	6,52	40,41	15,8500	6,21	15,8500	10
197	10475,2	9,54	46,62	13,9000	6,34	13,9000	10
198	16536	16,29	56,61	11,6200	6,04	11,6180	10
199	3670,41	12,72	57,40	21,0200	6,61	21,0220	10
200	34905,1	4,95	68,65	14,2300	6,23	14,2200	10
201	20445,4	0,94	69,48	15,5800	6,10	15,5800	10
202	38337	18,81	72,43	8,5400	6,46	8,5320	10
203	9153,58	10,70	74,14	8,7300	6,12	8,7340	10
204	20997	13,99	74,14	6,0700	6,03	6,0660	10
205	44682,1	10,29	12,25	18,8300	6,15	18,8300	10,1
206	18554,7	23,52	20,46	20,3900	6,05	20,3940	10,1
207	32665,8	6,43	-2,88	17,6400	6,28	17,6400	10,2
208	16917	2,19	0,14	14,8600	6,18	14,8620	10,2
209	7905,29	9,88	6,31	2,9700	6,20	2,9760	10,2
210	61,1431	21,77	6,68	11,6300	6,01	11,6220	10,2
211	20271,5	16,54	17,50	7,0200	6,00	7,0260	10,2
212	22100,9	0,72	23,93	11,6200	6,63	11,6200	10,2
213	2285,05	18,97	40,01	5,5400	6,27	5,5380	10,2
214	27964,8	14,40	46,62	21,1300	6,39	21,1280	10,2
215	258,895	10,50	48,92	1,5900	6,01	1,5900	10,2
216	2158,77	11,16	53,51	11,9500	6,16	11,9520	10,2
217	19237,5	14,44	70,34	15,0200	6,37	15,0160	10,2
218	26686,2	4,64	-9,66	15,2100	6,29	15,2120	10,3
219	39150,4	20,72	-8,78	5,5200	6,21	5,5260	10,3
220	17969,6	15,62	55,42	28,2000	6,08	28,1960	10,3
221	16003,7	15,07	55,82	10,7500	6,31	10,7500	10,3
222	23705,3	3,81	-11,23	24,6400	6,11	24,6420	10,5
223	35344,2	7,04	-8,90	14,9700	6,33	14,9660	10,5
224	17994,3	14,84	-8,78	14,9900	6,21	14,9840	10,5
225	5440,83	23,33	11,25	10,6700	6,05	10,6700	10,5
226	45117,7	10,35	11,25	12,7200	6,11	12,7180	10,5
227	9133,69	0,55	16,89	20,5300	7,13	20,5280	10,5
228	5567,9	12,46	17,96	27,1300	6,15	27,1320	10,5
229	18469,5	11,82	20,55	25,9000	6,05	25,9000	10,5

База даних. Продовження

230	5362,34	7,83	26,47	27,9100	6,05	27,9060	10,5
231	2638,66	19,69	34,91	24,4800	6,27	24,4800	10,5
232	4697,88	20,26	35,72	13,1100	6,00	13,1100	10,5
233	32629,7	15,63	43,54	13,0700	6,19	13,0800	10,5
234	3490,74	12,67	57,01	5,6300	6,10	5,6180	10,5
235	788,442	7,64	67,94	18,2700	6,07	12,2780	10,5
236	6599,05	21,09	69,48	15,6100	6,02	15,6060	10,5
237	31134,3	16,81	72,86	13,0900	6,00	13,0880	10,5
238	30953,4	2,97	20,01	8,7000	6,23	8,7020	10,6
239	13174,8	12,76	70,76	12,7300	6,29	12,7240	10,8
240	4888,68	22,71	-4,85	8,0300	6,47	8,0280	10,9
241	37080,1	4,64	39,62	16,4600	6,43	16,4500	10,9
242	7774,93	20,98	70,26	7,8300	6,24	7,8320	10,9
243	17859,6	14,81	-11,92	18,2900	6,42	18,2900	11
244	38259,8	17,92	-10,47	14,0700	6,01	14,0720	11
245	33798,5	19,23	-10,31	11,7600	6,30	11,7560	11
246	13423,8	0,95	-9,66	9,6600	6,35	9,6640	11
247	33331	6,75	-1,08	13,5000	6,03	13,5000	11
248	38308	8,26	1,24	16,9600	6,07	16,9620	11
249	29428,1	5,79	2,41	8,9500	6,33	8,9520	11
250	12280,4	1,36	15,55	4,7300	6,66	4,7280	11
251	17774,3	15,85	17,50	16,5500	6,00	16,5500	11
252	1601,89	19,03	23,49	5,6600	6,74	5,6620	11
253	8669,74	20,99	23,49	2,6600	6,03	2,6640	11
254	12556	11,52	24,85	11,4500	6,10	11,4500	11
255	7924,34	8,54	26,47	25,5600	6,25	25,5560	11
256	1364,44	19,01	27,30	12,0700	6,59	12,0700	11
257	35977,4	4,69	29,75	9,6100	6,29	9,6100	11
258	37268,7	16,95	33,78	13,8100	6,11	13,8060	11
259	13866,1	22,19	39,62	26,7900	6,40	26,7800	11
260	31175,7	19,09	49,71	26,4000	6,01	26,4040	11
261	427,033	11,88	58,93	5,6300	6,06	5,6320	11
262	27790	16,82	70,76	10,3900	6,34	10,3880	11
263	39518,6	19,13	72,86	17,1300	6,17	17,1300	11
264	22491,6	14,40	74,14	8,5400	6,80	8,5340	11
265	36515	17,67	74,50	21,2700	6,16	21,2680	11
266	31998,6	6,70	9,23	10,4800	6,25	10,4840	11,1
267	20320,4	0,23	24,79	14,2000	6,16	14,2000	11,1
268	19193,9	0,36	36,52	12,8400	6,16	12,8400	11,1

База даних. Продовження

269	45798,9	7,06	39,22	11,0000	6,09	11,0000	11,1
270	14193,3	11,24	-10,47	10,0000	5,93	10,0000	11,2
271	30767,6	5,84	-6,82	7,4500	6,51	7,4480	11,2
272	37241,6	4,93	23,93	7,9500	6,26	7,9500	11,2
273	12580,8	10,06	43,14	25,5400	6,56	25,5400	11,2
274	27107	4,89	-2,88	11,0600	6,02	11,0660	11,3
275	21924,6	0,79	29,75	14,5000	6,41	14,5040	11,3
276	19817,3	12,01	41,16	15,3500	5,51	15,3500	11,3
277	25713,4	4,37	-11,23	23,2600	6,24	23,2600	11,4
278	4090,84	23,02	11,75	10,0400	6,09	10,0420	11,5
279	1738,8	7,17	18,75	11,2600	6,22	11,2720	11,5
280	14495,6	22,46	21,80	12,3300	6,09	12,3300	11,5
281	14231,4	11,98	24,41	18,7200	6,61	18,7200	11,5
282	35730,3	4,75	32,17	7,2800	6,22	7,2860	11,5
283	315,335	6,66	43,14	21,0200	6,29	21,0220	11,5
284	9916,98	10,18	67,12	2,6500	6,02	2,6540	11,5
285	1468,37	7,83	67,94	18,9000	6,12	18,9000	11,5
286	5311,52	20,73	68,23	10,5100	6,08	10,5100	11,5
287	30973,8	16,13	74,50	13,9200	6,02	13,9160	11,5
288	26157,4	1,96	29,34	27,0600	6,01	27,0580	11,7
289	30297,7	18,26	-11,92	14,0700	6,41	14,0720	11,8
290	23810,1	4,50	11,75	3,6800	6,17	3,6760	11,8
291	34678	4,40	31,35	8,2100	6,34	8,2100	11,8
292	30765,3	15,84	-8,94	25,7300	6,14	25,7300	12
293	21003,7	3,12	-8,27	26,7300	6,03	26,7440	12
294	2112,21	22,27	4,03	16,7200	6,20	16,7220	12
295	45632,7	20,30	4,20	18,8700	6,19	18,8660	12
296	36656,1	7,93	7,22	15,4900	6,23	15,4840	12
297	30786,6	19,47	16,57	22,8900	5,70	22,8900	12
298	34406,7	20,47	16,57	19,5300	6,04	19,5360	12
299	10867,2	21,39	21,36	21,0600	6,32	21,0560	12
300	16960,2	23,14	21,80	13,0300	6,17	13,0220	12
301	2613,48	19,16	22,24	12,6500	6,11	12,6500	12
302	3947,89	19,68	23,49	9,3700	6,21	9,3680	12
303	68,1416	18,60	24,79	26,4500	6,11	26,4520	12
304	24738	13,21	26,89	14,5300	6,43	14,5320	12
305	6331,61	20,39	28,14	26,0000	6,19	26,0000	12
306	42322,1	6,72	35,31	7,2400	6,16	7,2400	12
307	84,7599	6,53	42,35	4,8100	6,08	4,8100	12

База даних. Продовження

308	18270,2	15,64	54,30	8,8100	6,31	8,8080	12
309	2544,77	12,40	56,61	17,1000	6,33	17,1000	12
310	33133,5	4,03	70,68	7,2600	6,10	7,2600	12
311	41687,3	21,43	10,31	1,5400	6,21	1,5400	12,1
312	6284,92	20,38	27,30	12,4800	6,01	12,4800	12,1
313	18543,1	0,41	69,48	12,5800	6,04	12,5780	12,1
314	3473,66	10,81	-8,78	5,6500	6,50	5,6500	12,2
315	23728,7	13,28	20,55	24,3100	6,48	24,3100	12,2
316	20140,1	12,28	20,11	13,9100	6,09	13,9120	12,3
317	10121,5	9,31	41,96	14,8200	5,99	14,8220	12,3
318	20816,5	12,35	43,54	20,7700	6,18	20,7760	12,3
319	4905,24	11,99	55,42	6,3300	6,29	6,3300	12,3
320	20973,5	3,58	6,68	22,6400	6,47	22,6400	12,5
321	29461,6	5,93	8,27	4,9700	6,04	4,9700	12,5
322	16273,4	11,21	20,11	14,5300	6,06	14,5280	12,5
323	36717	4,57	20,91	12,3900	6,06	12,3880	12,5
324	18813,3	12,65	67,94	3,6800	6,01	3,6800	12,5
325	15192,4	23,48	68,23	15,5700	6,15	15,5640	12,5
326	18967,2	13,42	74,14	12,8200	6,17	12,8180	12,5
327	28883	2,98	35,72	5,6500	6,01	5,6440	12,9
328	42378,6	9,00	-12,04	11,3200	6,10	11,3080	13
329	24653,1	4,20	-3,53	19,5900	6,12	19,5900	13
330	39676,8	21,93	17,50	10,7800	6,06	10,7800	13
331	4511,98	7,94	18,75	9,4200	6,39	9,4220	13
332	14410,9	14,63	55,82	10,1200	6,53	10,1240	13
333	35824,7	4,58	28,14	25,7000	6,02	25,7000	13,1
334	28565,5	14,44	42,35	13,0900	6,01	13,0940	13,1
335	9141,73	20,91	21,36	5,5500	6,34	5,5300	13,2
336	3539,8	22,34	-2,88	22,2300	6,06	22,2320	13,3
337	40698,8	22,22	16,57	17,5800	6,02	17,5880	13,3
338	41473,1	18,82	-10,47	21,8000	6,15	21,7980	13,5
339	2575,91	8,08	-6,15	17,7000	6,67	17,7000	13,5
340	4647,5	23,17	12,25	12,9100	6,55	12,9160	13,5
341	882,901	6,58	26,47	6,8200	6,06	6,8200	13,5
342	11600,7	9,79	43,54	9,4200	6,74	9,4220	13,5
343	28022,1	5,14	-3,53	4,7000	6,18	4,7000	13,7
344	30884,4	15,38	39,64	19,3500	6,34	19,3440	13,7
345	18100,7	12,32	-8,94	11,0200	6,16	11,0200	13,8
346	35087,6	7,23	0,14	5,8800	6,23	5,8800	13,8

База даних. Продовження

347	18925,8	2,48	-8,90	9,8100	6,15	9,8080	14
348	6673,23	23,54	6,22	12,8300	6,07	12,8280	14
349	41886,4	22,55	17,96	10,6300	6,28	10,6380	14
350	8046,8	20,60	20,46	11,0800	6,01	11,0780	14
351	26444,8	14,03	20,55	25,7000	6,50	25,7000	14
352	24016,4	13,24	44,72	18,6600	6,18	18,6600	14
353	35706,5	7,14	-12,04	20,8400	6,23	20,8320	14,5
354	26966,4	1,92	23,12	11,0700	6,05	11,0740	14,5
355	33453,1	3,63	39,62	7,0300	6,15	7,0300	14,6
356	30445,5	15,88	66,71	8,7600	6,18	8,7480	14,8
357	45445,1	10,11	0,74	22,9200	6,42	22,9240	15
358	21499,7	0,40	21,80	15,8700	6,08	15,8660	15
359	45469,6	9,85	-12,04	13,3700	6,09	13,3700	15,2
360	37959,1	17,96	67,94	19,6900	6,12	19,6880	15,5
361	23313,9	14,63	74,14	4,9100	6,13	4,9060	15,5
362	3853,11	22,82	7,74	18,1600	6,13	18,1600	16
363	10854,9	1,03	18,28	13,7300	6,15	13,7340	16
364	36640,7	16,75	44,32	5,8100	6,44	5,8120	16
365	9026,31	11,61	70,34	12,8100	6,92	12,8080	16
366	20667,8	3,49	6,68	8,1700	6,14	8,1680	16,5
367	31144,9	3,08	22,24	15,3300	6,79	15,3300	16,5
368	18336,9	23,92	32,17	23,2700	6,18	23,2600	16,5
369	1962,94	22,36	10,25	13,9500	6,51	13,9580	16,7
370	21060,3	12,71	41,97	11,3500	6,25	11,3540	17
371	456,25	7,55	67,12	28,6200	6,05	28,6180	17
372	44050,9	6,60	20,46	9,5100	6,18	9,5100	17,2
373	42802,1	9,25	-2,24	12,3700	6,05	12,3720	18
374	2052,84	11,48	16,57	5,4500	6,06	5,4480	18
375	44948,3	10,17	5,68	17,3800	6,05	17,3940	18,5
376	12597	21,93	22,24	17,6100	6,15	17,6100	18,5
377	40417,1	8,58	-3,53	15,8500	6,06	15,8500	19
378	29099,9	18,64	53,12	26,8000	7,70	26,8060	20,5
379	13201,8	22,03	20,91	11,0000	6,15	11,0000	23,5
380	28653,6	5,71	8,79	15,7600	6,01	15,7560	25