

## Поиск импульсного излучения рентгеновских радиотихих одиночных нейтронных звезд в декаметровом диапазоне

В. В. Захаренко, А. В. Маркова, Я. Ю. Васильева

*Радиоастрономический институт НАН Украины,  
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина  
E-mail: zakhar@rian.kharkov.ua*

*Статья поступила в редакцию 16 марта 2010 г.*

Основной целью настоящей работы является поиск радиоизлучения рентгеновских одиночных нейтронных звезд (XDINS) в декаметровом диапазоне длин волн, поскольку появились противоречивые данные о наличии или отсутствии у них импульсного излучения. Основанием для проведения поисковых экспериментов стало внедрение на радиотелескопе УТР-2 нового широкополосного высокочувствительного приемника с большим динамическим диапазоном и разработка пакета программ поиска импульсного и повторяющегося излучения.

Полученные результаты не позволяют говорить о наличии импульсного излучения от источников 1RXS J1308+21 и 1RXS J2143+06 на уровне выше  $4\sigma$  при  $\sigma = 2.5$  мЯн. Объяснением этому может служить как отсутствие излучения, так и завал спектра на низких частотах или изменение характера сигнала. Высокая чувствительность эксперимента и разработанного пакета поисковых программ доказана уверенным обнаружением ( $> 10\sigma$ ) “тестового” слабого пульсара B1508+55, который никогда раньше не детектировался на декаметровых волнах.

### 1. Введение

Наблюдения нейтронных звезд (НЗ) имеют уже более чем 40-летнюю историю. Основная доля известных НЗ – радиопульсары. В течение первых лет изучения НЗ установилась картина эволюции этих объектов, в которой роль своеобразного стандарта выполнял пульсар в Крабовидной туманности. Но в последнее время было обнаружено значительное количество новых типов нейтронных звезд, имеющих существенные отличия как в характеристиках принимаемого от них излучения, так и в физике порождающих его процессов [1]. Открытие магнитаров, быстрых радио транзиентов, вспышек внегалактической природы, изучение источников повторяющихся гамма-всплесков, радиотихих нейтронных звезд и т. п. показало, что существует много вариантов эволюции нейтронных звезд и их наблюдательных проявлений.

Основной целью настоящей работы является поиск радиоизлучения рентгеновских одиночных НЗ – XDINS (X-ray Dim Isolated Neutron Stars) – в декаметровом диапазоне длин волн.

Для единичных или очень редких импульсных сигналов дисперсия зачастую становится единственным признаком удаленности источника, по которому можно выделить искомый сигнал из помех искусственного происхождения. Поскольку наблюдения ведутся в некотором конечном диапазоне  $\Delta\omega$ , для далеких источников на низких частотах импульсы столь сильно уширяются, что излучение из импульсного превращается в непрерывное. Для близких источников на высоких частотах запаздывание столь мало, что дисперсия даже во всем рабочем диапазоне не дает возможности отличить радиоастрономические источники от помех.

Поэтому на высоких частотах ( $> 300$  МГц) искать аналогичные источники на расстояниях от нескольких десятков до сотен парсек затруднительно. Здесь мы сталкиваемся с редкой ситуацией, когда проще обнаружить далекие объекты. Но есть много признаков наличия близких НЗ. Солнечная система располагается в районе Галактики, где в настоящее время наблюдается избыток массивных звезд. Это и близкие ОВ-ассоциации собственно галактического населения, и близкий к нам пояс Гулда, богатый молодыми массивными звездами, и “локальный пузырь” (Local Bubble), который, по-видимому, является следствием цепочки взрывов сверхновых. Учитывая быструю эволюцию массивных звезд, следует ожидать обнаружения большого количества их остатков – молодых НЗ.

Отличительной особенностью недавно открытых типов НЗ оказались их периоды – порядка нескольких секунд, что указывает на “генетическую” связь между RRATs (Rotating Radio Transients), магнитарами и радиотихими близкими XDINS, которые были открыты спутником POCAT (семь близких НЗ, иногда называемых “Великолепной семеркой”). Как показано в работах [2, 3], исходя из анализа диаграммы “период – производная периода”, частота рождения RRATs ближе к частоте XDINS, чем к частоте магнитаров. RRATs и XDINS имеют похожие периоды, производные периода, возраст и напряженность магнитного поля. Кроме того, RRATs по параметру замедления вращения больше похожи на нормальные радиопульсары. Поскольку расстояние до XDINS меньше, чем до RRATs, чувствительность в эксперименте к RRATs-подобному радиоизлучению должна быть достаточно высокой. Все это делает одиночные НЗ исключительно интересным объектом исследования.

Спорадичность радиоизлучения НЗ также сильно варьируется. В ряду между нормальными радиопульсарами и истинно радиотихими НЗ располагаются различные источники с убывающей импульсной активностью, такие, как пульсары с нуллингом, RRATs или пульсары с аномально интенсивными импульсами,

что характерно для декаметрового диапазона. Изучение этих объектов требует проведения наблюдения во всех частях спектра, в том числе и в разных частях радиодиапазона – от декаметрового до сантиметрового. Поэтому поиск радиоизлучения от одиночных НЗ всех типов является актуальным как для построения модели излучения самих источников, так и для определения параметров и причин эволюции НЗ по различным сценариям.

В последнее время появились данные о том, что обнаружено радиоизлучение от двух одиночных НЗ на частоте 111 МГц [4]. Результат был получен на БСА (Пушино, Россия), – радиотелескопе меридианного типа с заполненной апертурой (плоская эквидистантная решетка с размерами  $187 \times 384$  м соответственно в направлении восток–запад и север–юг из 16384 волновых диполей). Эффективная площадь равна  $20\,000$  м<sup>2</sup>. Оценки потоков для двух XDINS (1RXS J1308+21 и 1RXS J2143+06) в этих экспериментах составили  $(50 \pm 20)$  и  $(60 \pm 25)$  мЯн, а мера дисперсии DM (dispersion measure) –  $(5.7 \pm 0.5)$  и  $(8 \pm 5)$  пк/см<sup>3</sup> соответственно.

Для проверки наличия радиоизлучения в близком, но более высокочастотном диапазоне были проведены наблюдения на крупнейшем радиотелескопе дециметровых длин волн Green Bank Telescope (GBT) в Западной Вирджинии (США) [2, 3].

На частоте 820 МГц осуществлялся поиск радиоизлучения от шести из семи известных XDINS. Компенсация меры дисперсии проводилась во всем диапазоне от 0 до  $20$  пк/см<sup>3</sup>, т. е. с большим запасом (при шаге  $\Delta DM \sim 0.01$  пк/см<sup>3</sup>).

В результате исследования не обнаружено импульсного излучения выше  $4\sigma$ . Соответствующий предел обнаружения находился в диапазоне  $0.01 \div 0.04$  мЯн в зависимости от источника в предположении, что длительность импульса составляет 2 % от длительности периода.

Авторы объясняют это тремя возможными причинами. Во-первых, различие в диаграммах направленности источника на разных частотах может приводить к тому, что расширяющийся к более низким частотам луч от

источника становится виден. Во-вторых, крутой спектральный индекс (до  $-3.6$ ) не позволяет обнаруживать сигнал на частотах около гигагерца. Кроме этого, характер излучения может становиться более нерегулярным.

С учетом столь противоречивых данных представляется крайне важным провести поиски радиоизлучения в ином, но достаточно близком диапазоне частот. Декаметровый диапазон из-за значительной дисперсии в межзвездной среде является весьма многообещающим для обнаружения редких или единичных транзиентов от близких галактических источников (менее 1 кпк), которые впоследствии могут быть отождествлены с НЗ.

## 2. Аппаратура и наблюдения

Задача детектирования радиоизлучения от слабых короткопериодических источников требует максимальной чувствительности, а значит большой эффективной площади антенны, высокого временного разрешения и максимально широкого частотного диапазона. Крупнейший в мире радиотелескоп декаметрового диапазона длин волн УТР-2 [5] и широкополосные приемники обеспечивают наилучшие условия для проведения подобных исследований и максимально достижимую чувствительность.

В качестве регистрирующей аппаратуры в эксперименте был использован широкополосный приемник с 16-битным аналого-цифровым преобразователем [6]. Вычисление и накопление спектров производилось в режиме реального времени. Параметры данного приемника (временное разрешение, диапазон частот) и динамический диапазон входных сигналов могут изменяться в широких пределах. Исходя из требований задачи и ожидаемой длительности импульса временное разрешение устанавливалось в пределах  $10 \div 25$  мс, а частотный диапазон был выбран  $16.5 \div 33.0$  МГц.

Для поиска излучения XDINS была проведена серия наблюдений с 31 января по 4 февраля 2008 г. с эффективным временем накопления по каждому источнику  $3 \div 4$  ч ( $1000 \div 1500$  периодов). Для сравнительного анализа чувствительности были проведены тестовые записи

хорошо известных пульсаров. Один из них – это достаточно мощный близкий пульсар PSR B1133+16 ( $DM \sim 4.8$  пк/см<sup>3</sup>), второй – слабый никогда ранее не наблюдавшийся на декаметровых волнах пульсар PSR B1508+55 ( $DM \sim 20$  пк/см<sup>3</sup>).

## 3. Результаты обработки тестовых записей

Для дальнейшей обработки сигналы, очищенные от помех, суммируются по субполосам шириной  $\sim 1$  МГц. Полученные таким образом данные записываются в промежуточные файлы, позволяющие варьировать время накопления, оптимизировать временное разрешение, фильтровать низкоуровневые помехи и т. п.

Разработанный пакет поисковых программ был протестирован на мощном близком пульсаре PSR B1133+16. На рис. 1 приведен сигнал одной субполосы ( $21.5$  МГц  $\pm 0.5$  МГц) за время  $\sim 1700$  с (около полутора тысяч периодов пульсара). Верхняя левая панель представляет сумму временной последовательности импульсов, приведенных на нижней панели. Вне импульса вычисляется среднеквадратичное отклонение, и сигнал нормируется на него. На правой панели показан средний импульс в единицах  $\sigma$  за то же время, но во всей полосе.

Из полученных результатов легко определить поток радиоизлучения, воспользовавшись известной формулой:

$$S = \sigma = \frac{2kT}{A_e \sqrt{\Delta f \Delta \tau t_i / P}},$$

где  $S$  – чувствительность на уровне  $1\sigma$ ,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура галактического фона,  $A_e$  – эффективная площадь телескопа,  $\Delta f$  – полоса частот,  $\Delta \tau$  – время наблюдения,  $t_i/P$  – соотношение времени, занятого собственно импульсом, и периода пульсара. При  $T \sim 20000$  К,  $A_e \sim 100000$  м<sup>2</sup>,  $\Delta f = 16.5$  МГц,  $\Delta \tau = 4$  ч,  $t_i/P = 20$  % чувствительность находится на уровне около  $2.5$  мЯн.

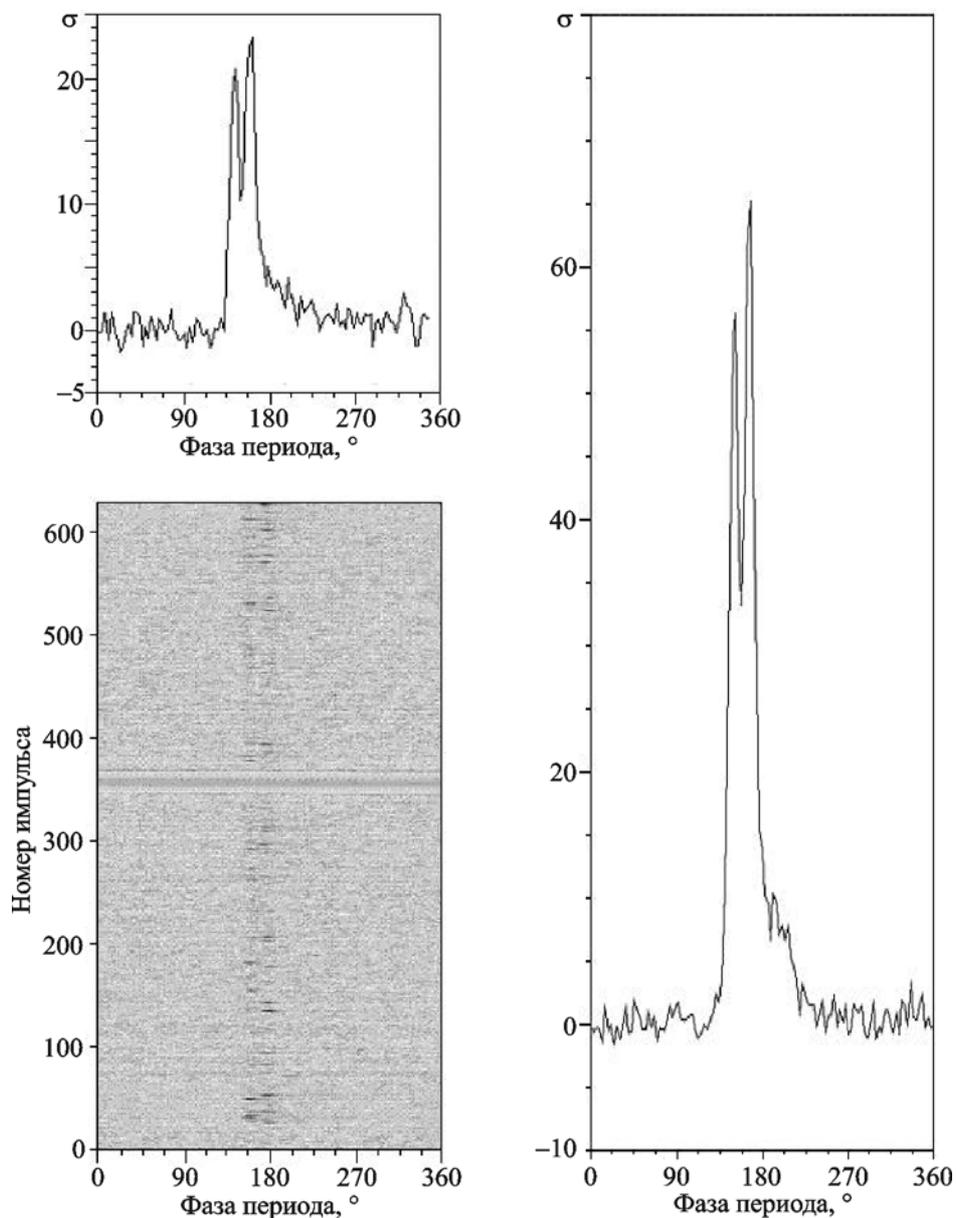


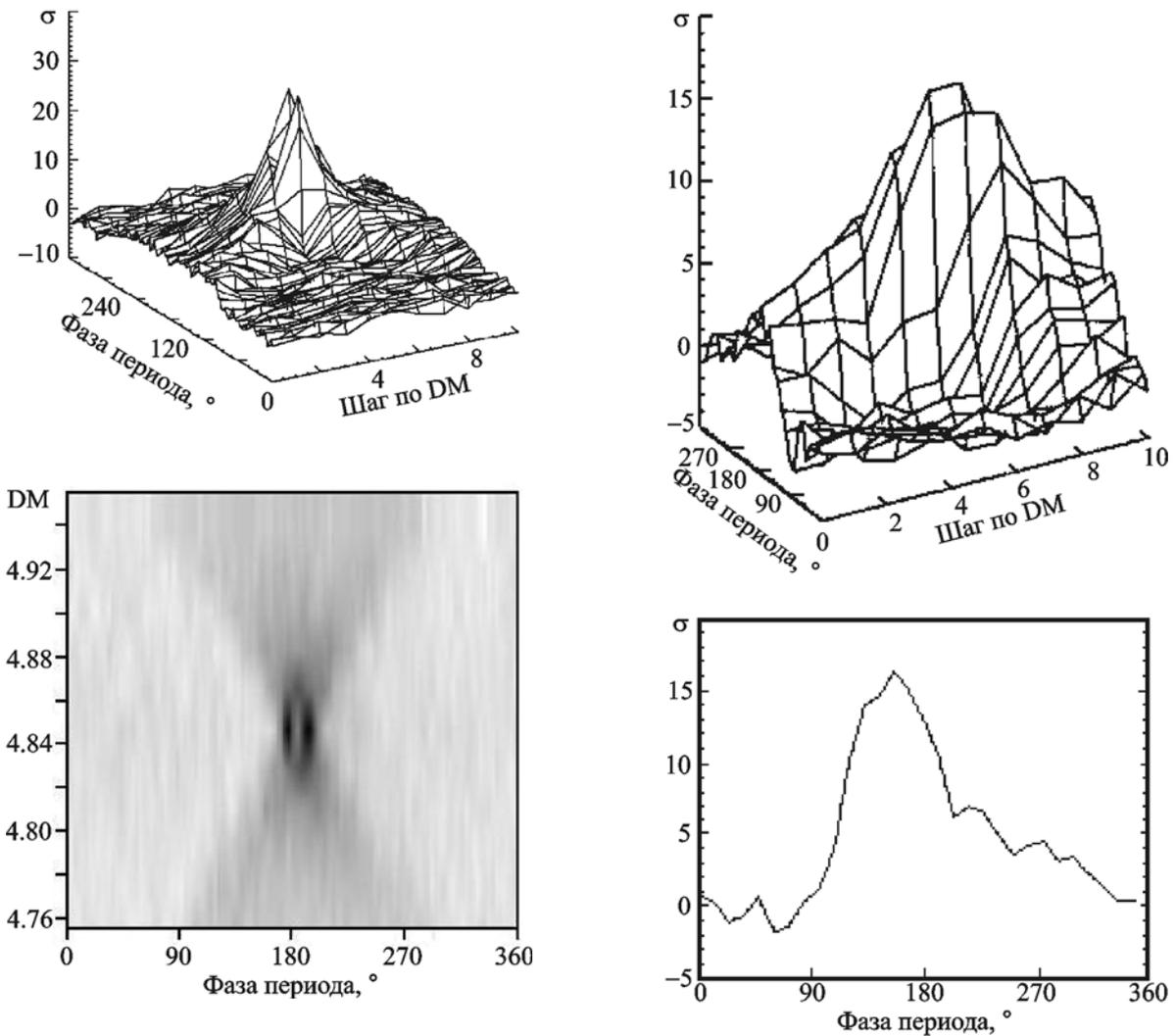
Рис. 1. Сигнал одной субполосы,  $21.5 \text{ МГц} \pm 0.5 \text{ МГц}$ , (слева) и в полосе  $16.5 \text{ МГц}$  (справа) за время  $\sim 1700 \text{ с}$

Разработанная в настоящей работе методика поиска сигнала по величине DM дает возможность поиска как одиночных транзientных событий, так и накопленных средних профилей в зависимости от DM. На рис. 2 приведены данные в координатах DM – фаза периода с изменением значения DM на  $\pm 0.1 \text{ пк/см}^3$  от известного (“прицельного”) с шагом  $0.02 \text{ пк/см}^3$ . В канале  $1 \text{ МГц}$  сигнал “разваливается” за 3–4 шага по DM, в кана-

ле шириной  $10 \text{ МГц}$  достаточно двух шагов, чтобы сигнал стал близок к шуму ( $< 3\sigma$ ).

#### 4. Результаты и обсуждение

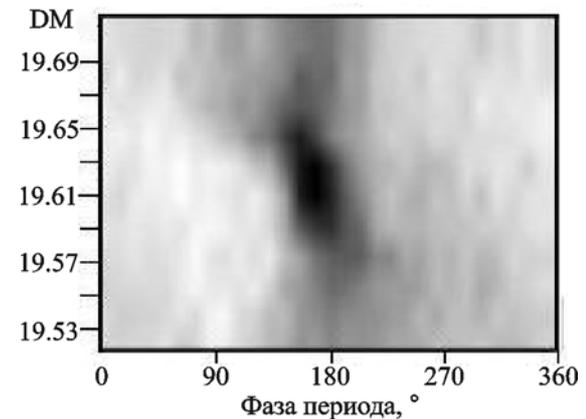
Отработанные процедуры были применены к записям излучения от двух XDINS и слабого пульсара PSR B1508+55, не наблюдавшегося ранее в дециметровом диапазоне длин волн.



**Рис. 2.** Зависимость отношения сигнал/шум среднего импульса PSR B1133+16 от меры дисперсии

На рис. 3 приведены данные обработки части записи радиоизлучения, ~1700 с, выбранного пульсара с  $DM = 19.61 \text{ пк/см}^3$ .

Уверенное обнаружение при ожидаемой мере дисперсии сигнала с уровнем детектирования около  $10\sigma$  никогда ранее не наблюдавшегося на декаметровых волнах пульсара PSR B1508+55 примерно за полчаса наблюдений в полосе 16.5 МГц показывает потенциал аппаратного и программного обеспечения эксперимента. Кроме того, исследования с более дробным шагом по DM ( $0.01 \text{ пк/см}^3$ ) дают максимум отношения сигнал/шум при  $DM = (19.62 \pm 0.01) \text{ пк/см}^3$ . То есть DM от-

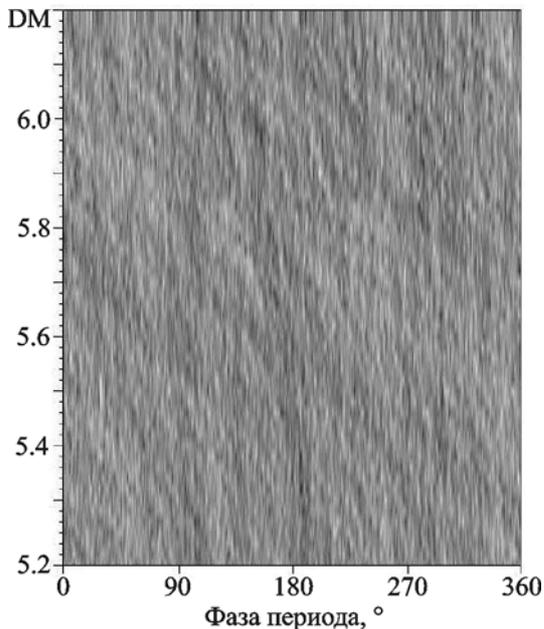


**Рис. 3.** Данные обработки записи радиоизлучения пульсара PSR B1508+55, ~1700 с (~2300 периодов), в полосе 16.5 МГц. При ожидаемом значении DM сигнал пульсара детектируется на уровне около  $17\sigma$ . Шаг по DM равен  $0.02 \text{ пк/см}^3$

личается от приведенной в каталоге пульсаров [7],  $(19.590 \pm 0.005)$  пк/см<sup>3</sup>, и в работе [8],  $(19.613 \pm 0.02)$  пк/см<sup>3</sup>, хоть и незначительно. Данное отличие уверенно регистрируется как в трех записанных файлах по отдельности, так и в накопленной записи. Этот факт говорит о том, что неточное попадание в “истинную” меру дисперсии позволяет тем не менее уверенно регистрировать слабые источники.

На последующих рисунках показаны примеры обработки записей радиоизлучения источников 1RXS J1308+21 и 1RXS J2143+06.

Источник 1RXS J1308+21 наблюдался в очень благоприятной помеховой ситуации: ночные часы, зима, минимум солнечной активности. На рис. 4 приведен пример результатов обработки данных в координатах DM – фаза периода с изменением значения DM на  $\pm 0.5$  пк/см<sup>3</sup> с шагом 0.02 пк/см<sup>3</sup> в полосе 16.5 МГц. Присутствует слабое влияние широкополосных помех (широкие полосы с сильным наклоном). Сигнала с близкой к обнаруженной в [4] DM выше  $4\sigma$  не обнаружено.

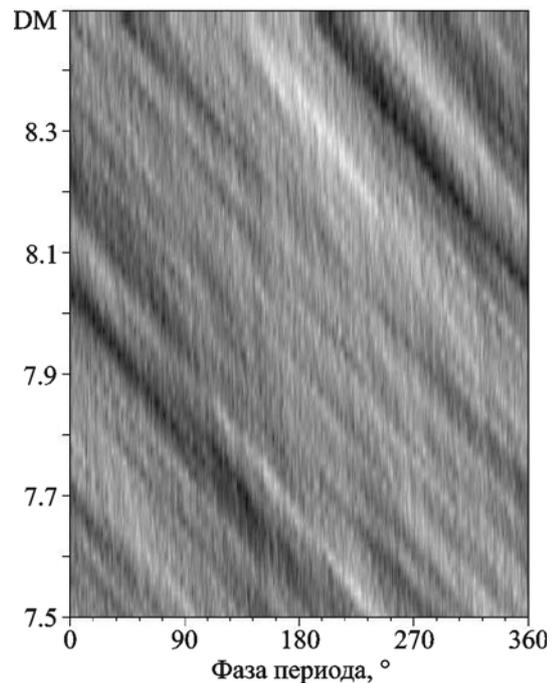


**Рис. 4.** Результаты обработки записей радиоизлучения источника 1RXS J1308+21 в координатах DM – фаза периода с изменением значения DM на  $\pm 0.5$  пк/см<sup>3</sup> с шагом 0.02 пк/см<sup>3</sup> в полосе 16.5 МГц

Другой источник 1RXS J2143+06 наблюдался не в таких хороших условиях (в дневное время). Результаты обработки данных приведены на рис. 5.

В данных присутствуют короткие всплески выше заданного порога детектирования ( $4\sigma$ ). Однако обработка с временным разрешением, соответствующим соотношению  $t_i/P = 2 \div 20$  % показывает отсутствие искомого сигнала, облучающего близкой к обнаруженной [4] DM.

Полученные результаты не позволяют говорить о наличии импульсного излучения от данных источников на уровне выше  $4\sigma$ . Объяснением этому может служить завал спектра на низких частотах, связанный с физической природой источника. Наклон спектра (степень  $\sim 1.1 \div 1.5$ ) в диапазоне частот  $25 \div 111$  МГц должен иметь обратный знак по отношению к наклону в диапазоне  $111 \div 820$  МГц. Предположение о различных диаграммах направ-



**Рис. 5.** Результаты обработки радиоизлучения источника 1RXS J2143+06 в координатах DM – фаза периода с изменением значения DM на  $\pm 0.5$  пк/см<sup>3</sup> (приведен фрагмент с изменением DM в пределах  $\pm 0.5$  пк/см<sup>3</sup>) с шагом 0.02 пк/см<sup>3</sup> в полосе 16.5 МГц

ленности излучения (на высокой частоте уже, чем на низкой) можно отбросить, т. к. при этом в декаметровом диапазоне излучение заведомо должно было бы наблюдаться. Еще одним фактором, объясняющим отсутствие детектируемого импульсного излучения может быть изменение его характера. Известно [9], что на низких частотах оно может приобретать более спорадический вид, как это бывает в случае с пульсарами. Для выяснения справедливости такого предположения требуются дальнейшие измерения.

## 5. Заключение

В результате проделанной работы был определен верхний предел для повторяющегося импульсного излучения от источников 1RXS J1308+21 и 1RXS J2143+06 на уровне выше  $4\sigma$  при  $\sigma \sim 2.5$  мЯн в декаметровом диапазоне длин волн. Повторяющееся или спорадическое радиоизлучение зарегистрировано не было.

Причинами отсутствия детектирования могут быть завал спектра на низких частотах (степень  $\sim 1.1 \div 1.5$ , с обратным знаком наклона спектра по отношению к наклону в диапазоне  $111 \div 820$  МГц) или изменение характера излучения на более спорадический. Для проверки этого предположения требуется провести более длительные наблюдения.

Высокая чувствительность эксперимента и разработанного пакета поисковых программ доказана уверенным обнаружением ( $> 10\sigma$ ) “тестового” слабого пульсара B1508+55, который никогда раньше не детектировался на декаметровых волнах

## Литература

- McLaughlin M. A., Lyne A. G., Lorimer D. R., Kramer M., Faulkner A. J., Manchester R. N., Cordes J. M., Camilo F., Possenti A., Stairs I. H., Hobbs G., D’Amico N., Burgay M., and O’Brien J. T. Transient radio bursts from rotating neutron stars // *Nature*. – 2006. – Vol. 439. – P. 817-820.
- Kondratiev V. I., Burgay M., Possenti A., McLaughlin M. A., Lorimer D. R., Turolla R., Popov S., and Zane S. A Search for Pulsed and Bursty Radio Emission from X-ray Dim Isolated Neutron Stars // *AIP Conf. Proc.*, “40 Years of Pulsars: Millisecond Pulsars, Magnetars and More”. – Montreal (Canada). – 2008. – P. 348-350.
- Kondratiev V. I., McLaughlin M. A., Lorimer D. R., Burgay M., Possenti A., Turolla R., Popov S. B., and Zane S. New limits on radio emission from x-ray dim isolated neutron stars // *Astrophys. J.* – 2009. – Vol. 702. – P. 692-706.
- Malofeev V. M., Malov O. I. and Teplykh D. A. Radio emission from AXP and XDINS // *Astrophys. Space Sci.* – 2007. – Vol. 308, No. 1-4. – P. 211-216.
- Брауде С. Я., Мень А. В., Содин Л. Г. Радиотелескоп декаметрового диапазона волн УТР-2 // *Антенны*. – М.: Связь. – 1978. – Вып. 26. – С. 12-35.
- Kozhin R. V., Vynogradov V. V., and Vavriv D. M. Low-noise, high dynamic range digital receiver/spectrometer for radio astronomy applications // *MSMW’07 Symposium proc.* – Kharkiv (Ukraine) – 2007. – P. 736-738.
- Taylor J. H., Manchester R. N. and Lyne A. G. Catalog of 558 pulsars // *Asrtophys. J. Suppl. Ser.* – 1993. – Vol. 88. – P. 529-568.
- <<http://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/>>
- Ульянов О. М., Захаренко В. В., Коноваленко А. А., Лекашо А., Розолен К., Рукер Х. О. Обнаружение индивидуальных импульсов пульсаров B0809+74; B0834+06; B0950+08; B0943+10; B1133+16 в декаметровом диапазоне волн // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2006. – Т. 11, №2. – С. 113-133.

## Пошук імпульсного випромінювання рентгенівських радіотихих поодиноких нейтронних зірок у декаметровому діапазоні

**В. В. Захаренко, А. В. Маркова,  
Я. Ю. Васильєва**

Основною метою даної роботи є пошук радіовипромінювання рентгенівських поодиноких нейтронних зірок (XDINS) у декаметровому діапазоні довжин хвиль, оскільки з’явилися суперечливі дані про наявність або відсутність у них імпульсного випромінювання. Підставою для пошукових експериментів було впровадження на радіотелескопі УТР-2 нового ширококутового високочутливого приймача з великим динамічним діапазоном і розробка пакета програм пошуку імпульсного та повторюваного випромінювання.

Отримані результати не дозволяють твердити про наявність імпульсного випромінювання від джерел 1RXS J1308+21 та 1RXS J2143+06 на рівні вище  $4\sigma$  при  $\sigma = 2.5$  мЯн. Поясненням цьому може бути як відсутність випромінювання, так і завал спектра на низьких частотах або зміна характеру сигналу. Висока чутливість експерименту та розробленого пакета пошукових програм доведена впевненим детектуванням ( $>10\sigma$ ) “тестового” слабого пульсара B1508+55, який ніколи раніше не реєструвався на декаметрових хвилях.

### **A Search for Pulsed Radio Emission from X-ray Dim Isolated Neutron Stars at Decameter Wavelengths**

**V. V. Zakharenko, A. V. Markova,  
and Y. Y. Vasylyeva**

Our work mainly deals with searching for the radio emission of x-ray dim isolated neutron stars (XDINS) at decameter wavelengths seeing that discrepant data about presence or absence of pulse radiation from them have appeared. The reasons for the search experiment performance became the installation of a new broadband high-sensitivity receiver with a high dynamic range at the UTR-2 radiotelescope and development of the software package for pulse and repetitive radiation search.

The results obtained give no ground to speak about the presence of pulse radiation from sources 1RXS J1308+21 and 1RXS J2143+06 at a level above  $4\sigma$ ,  $\sigma = 2.5$  mJy. This can be explained by both absence of radiation and an inverse spectrum slope at low frequencies or signal characteristics changing. High sensitivity of the experiment and developed package of search programs is proved by confident detection ( $>10\sigma$ ) of a “test” weak pulsar B1508+55 which has never been detected at decameter waves.