

УДК 524.354.4

## ПОИСК ПЕРИОДИЧЕСКОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ГАММА ПУЛЬСАРА J0357+3205 В ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЗАПИСЯХ НА ЧАСТОТЕ 111 МГц

С. А. Тюльбашев, М. А. Китаева

*Проведен поиск радиоизлучения от гамма пульсара J0357+3205 в метровом диапазоне длин волн. Периодическое излучение найдено в одном из 1700 проведенных сеансов наблюдений. Средний профиль пульсара – однокомпонентный с полушириной 20–25 мс. Оценка плотности потока пульсара 14 мЯн.*

**Ключевые слова:** радиоспокойные пульсары; наблюдения на низких частотах; анализ данных.

Запуск телескопа Fermi привел к открытию ряда гамма пульсаров [1]. Поиск периодического радиоизлучения от этих пульсаров показал, что в радиодиапазоне многие из них имеют низкую светимость [2], то есть являются радиоспокойными пульсарами. В 2018 году в Китае прошла конференция, на которой был представлен доклад с презентацией результатов наблюдений на 500-метровом телескопе FAST одного из таких пульсаров [3]. Согласно докладу, периодическое радиоизлучение гамма пульсара J0357+3205 было обнаружено в наблюдениях FAST, а также подтверждено наблюдениями на 300-метровом телескопе Аресибо.

С 2013 года на радиотелескопе БСА (большая синфазная антенна) ФИАН проводится ежедневный обзор неба на склонениях  $-9^\circ < \delta < +42^\circ$ . Этот обзор используется, в том числе, и для поиска пульсаров в суммарных спектрах мощности [4]. Суммирование спектров позволяет увеличить чувствительность за счет увеличения общего времени наблюдений для данного направления. Пульсар J0357+3205 попадает в исследуемую площадку, поэтому есть возможность его поиска в мониторинговых данных на интервале 5 лет. Несмотря на высокую чувствительность в поиске по суммарным спектрам, явно выраженных гармоник, обратная частота которых соответствовала бы периоду

---

ФИАН, Пушчинская радиоастрономическая обсерватория (ПРАО ФИАН); 142290, Россия, Московская обл., г. Пушино; e-mail: serg@prao.ru.

пульсара ( $P = 0.444104$  с), не обнаружено. С другой стороны, известно, что у пульсаров наблюдается как внутренняя (собственная), так и внешняя, индуцированная межзвездной средой, переменность. Так же возможна и вспышечная активность пульсара, или периоды длительных нуллингов. Поэтому есть вероятность обнаружить пульсар в индивидуальных записях, тогда как в суммарных спектрах мощности он не будет виден. На настоящий момент времени в направлении пульсара J0357+3205 имеется более 1700 сеансов наблюдений. В данной работе нами предпринята попытка поиска его периодического излучения по всем имеющимся данным.

*Наблюдения и результаты.* После реконструкции антенны, проходившей в 2010–2012 гг., эффективная площадь БСА ФИАН возросла до 45000 кв.м в направлении на зенит при геометрической площади антенны 72000 кв.м. Появилась принципиальная возможность реализации четырех независимых радиотелескопов на базе одного антенного поля. Сделаны новые цифровые регистраторы. Подробнее о научных программах и о деталях реконструкции радиотелескопа в работах [5] и [6].

Обзор на одной из реализаций радиотелескопа БСА ФИАН проводился круглосуточно. Использовались 96 лучей, расположенных в плоскости меридиана и фиксированных по направлению на небе. Размер диаграммы направленности одного луча составляет примерно  $0.5^\circ \times 1^\circ$ . Центральная частота наблюдений – около 110.5 МГц при полной полосе приема 2.5 МГц. Полоса разделена на отдельные, более узкие частотные каналы. На регистраторе одновременно реализовано два режима записи: в одном режиме полоса разделена на 6 каналов по 430 кГц и частота опроса составляет 10 Гц, а во втором полоса разделена на 32 канала по 78 кГц и частота опроса – 80 Гц.

Поиск периодического радиоизлучения от J0357+3205 проводился в индивидуальных спектрах мощности по всем обработанным дням с помощью программы *BSA-Analytics* (<https://github.com/vtyulb/BSA-analytics>; Qt/C++ под лицензией GPL V3.0). На первом этапе с помощью программы были отобраны спектры, имеющие гармоники, соответствующие периоду J0357+3205, отношение сигнал/шум которых было  $S/N > 3$ . Таких спектров оказалось 36. На втором этапе брались дни с первичными данными и проводился поиск пульсара. В программе *BSA-Analytics* был использован режим “single\_period”. В этом режиме задается известный период и координаты пульсара, не делается перебора периодов и сдвигов по времени для выявления точного местоположения пульсара по прямому восхождению. Поиск проводится на длине записи 180 с ( $\pm 1.5$  минуты от максимума диаграммы направленности БСА ФИАН). В качестве известного параметра брался период 0.4441 секунды, а затем проводился перебор мер

дисперсии на интервале  $0 < DM < 200$  пс/см<sup>3</sup>. Главным критерием обнаружения для пульсара с известным периодом считалось появление второго пика на среднем профиле при сложении исходного сигнала с двойным периодом при максимуме отношения  $S/N$  на мерах дисперсии, близких к истинной. Для двух дней (19.11.2015; 23.12.2016) из 36 обработанных на зависимости “сигнал – шум от меры дисперсии” появились пики в районе  $DM = 47$  пс/см<sup>3</sup>. Такая же мера дисперсии получена по наблюдениям FAST [3]. На рис. 1 представлена зависимость сигнала к шуму от наблюдаемой меры дисперсии и профиль накопленный с двойным периодом на мере дисперсии 47 пс/см<sup>3</sup>.

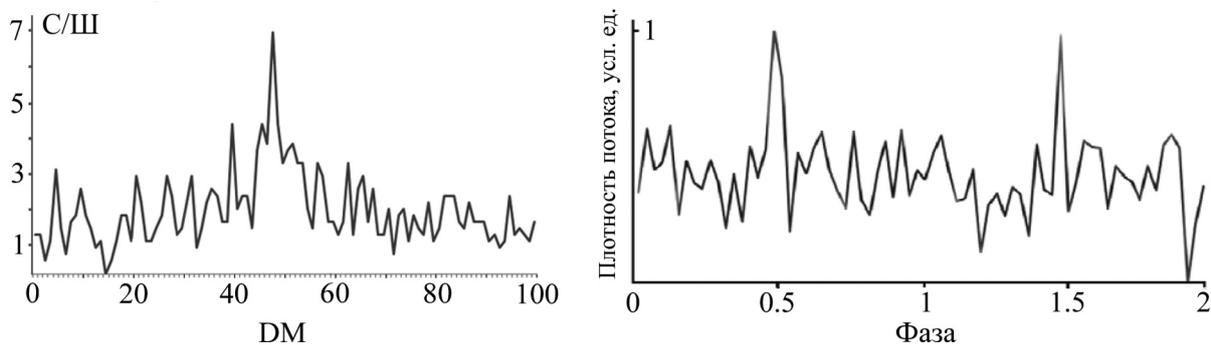


Рис. 1: На левой части рисунка показана зависимость  $S/N$  от  $DM$ . Горизонтальная ось показывает тестируемую меру дисперсии. По вертикальной оси приведено отношение сигнала к шуму на тестируемой мере дисперсии. Видно, что максимум зависимости попадает на меры дисперсии 46–48 пс/см<sup>3</sup>. На правой части рисунка представлен средний профиль пульсара J0357+3205 за 23 декабря 2016 года, накопленный с двойным периодом. По горизонтальной оси приведена фаза, показывающая распределение энергии в двойном профиле. По вертикальной оси – плотность потока в условных единицах (у.е.).

Сравним наши результаты с результатами, полученными другими авторами. В гамма диапазоне в профиле видна одна компонента, которая по половинной мощности занимает четверть периода [1]. То есть, полуширина профиля – около 100 мс. В рентгеновском диапазоне также видна одна компонента [7]. Ее полуширина – также около 100 мс. В радиодиапазоне [3] профиль двухкомпонентный. Исходя из профиля на рисунке, одна из компонент – широкая, и ее полуширина примерно равна 90 мс. Вторая компонента заметно уже, и сравнима по высоте с широкой компонентой. Ее полуширина составляет примерно 25–30 мс. Расстояние между компонентами – примерно 165 мс. В наших наблюдениях видна лишь одна узкая компонента, и ее полуширина равна

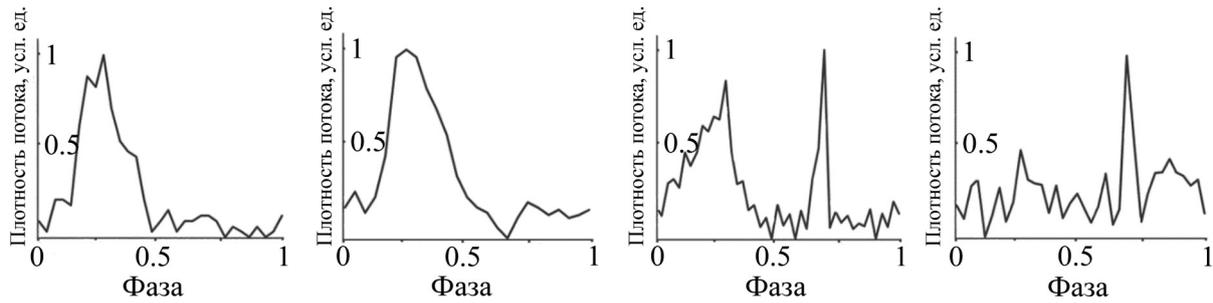


Рис. 2: Контуры средних профилей гамма пульсара  $J0357+3205$ , полученные при сложении с одним периодом. Слева направо представлены контуры извлеченные из рисунков средних профилей в гамма, рентгеновском и радиодиапазонах ([1], [7], [3]). Крайний правый рисунок – это средний профиль, полученный по наблюдениям на БСА ФИАН при усреднении с периодом  $P = 0.4441$  с. По горизонтальной оси на рисунке приведена фаза прихода излучения в среднем профиле в долях периода, по вертикальной оси приведена плотность потока в условных единицах (у.е.).

примерно 20–25 мс, что сравнимо с шириной узкой компоненты, наблюдаемой в FAST на частоте 1250 МГц. Высота пиков в среднем профиле равна  $7\sigma_{\text{noise}}$ . К сожалению, в презентации наблюдений FAST нет возможности сопоставить фазы прихода компонент средних профилей, наблюдаемых в гамма, рентгеновском и радиодиапазонах. Можно предположить, что широкая компонента, наблюдаемая в гамма, рентгеновском и в радиодиапазоне (FAST) – одна и та же, а узкая компонента, наблюдаемая в FAST, совпадает с узкой компонентой, наблюдаемой на БСА. На рис. 2 показаны средние профили по наблюдениям в разных диапазонах. Нормировка профилей была сделана так, чтобы максимумы на средних профилях совпадали по высоте. Длины средних профилей были сделаны одинаковыми.

Предполагая, что пульсар обнаружен, сделаем грубую оценку пиковой плотности потока пульсара, исходя из теоретической оценки наилучшей чувствительности БСА ФИАН в направлении зенита (4.4 мЯн; [6]). Так как точные координаты пульсара по прямому восхождению и склонению известны, можно сделать поправки, учитывающие особенности БСА ФИАН как дифракционной решетки. Эти поправки учитывают реальное зенитное расстояние источника (поправка = 0.76), а также то, что у БСА ФИАН фиксированное направление лучей на небе не совпадает с направлением на пульсар, и что луч имеет сложную форму (поправка = 0.47). Учтем также, что  $S/N = 10$  в полученном среднем профиле (рис. 2), а не  $S/N = 6$ , как предполагалось в теоретических

расчетах [6] (поправка=  $10/6 = 1.67$ ). Реальная ширина импульса составляет 5%, а не 10%, как считалось для типичного импульса в работе [6] (поправка= 0.70). Грубая оценка плотности потока:  $S_{111 \text{ МГц}} = (4.4 \times 1.67 \times 0.70)/(0.76 \times 0.47) = 14 \text{ мЯн}$ .

Предварительная оценка наблюдаемой плотности потока пульсара – 40 микроянских на частоте 1250 МГц [3]. Можно сделать формальную оценку крутизны спектра  $\alpha$ , где  $S \sim \nu^{-\alpha}$ . Оценка спектрального индекса:  $\alpha = +2.4$ . Значение спектрального индекса может быть существенно меньше, так как периодическое излучение найдено близко к пределу чувствительности радиотелескопа БСА ФИАН и лишь один раз за все сеансы наблюдений.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] A. A. Abdo et al., *Science* **325**, 840 (2009).
- [2] F. Camilo et al., *ApJ* **705**, 1 (2009).
- [3] Pei Wang et al., презентация на конференции FPS7, China, Guangzhou, 2018, [http://www.phy.pku.edu.cn/FPS/FPS7/FPS7\\_PPT/PeiWang.pdf](http://www.phy.pku.edu.cn/FPS/FPS7/FPS7_PPT/PeiWang.pdf)
- [4] S. A. Tyul'bashev, V. S. Tyul'bashev, M. A. Kitaeva et al., *Astronomy Reports* **61**, 848 (2017).
- [5] V. I. Shishov et al., *Astronomy Reports* **60**, 1067 (2016).
- [6] S. A. Tyul'bashev, V. S. Tyul'bashev, V. V. Oreshko, S. V. Logvinenko, *Astronomy Reports* **60**, 220 (2016).
- [7] M. Marelli et al., *ApJ* **765**, 36 (2013).

Поступила в редакцию 13 мая 2019 г.

После доработки 4 июля 2019 г.

Принята к публикации 4 июля 2019 г.