

ОБНАРУЖЕНИЕ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ОТ ГЕМИНГАПОДОБНОГО ГАММА-ПУЛЬСАРА J1836+5925

© 2023 г. В. М. Малофеев^{1*}, О. И. Малов¹, Д. А. Теплых¹, М. А. Тимиркеева¹

¹ Физический институт им. П.Н. Лебедева, Пушчинская радиоастрономическая обсерватория
АКЦ ФИАН, Пушино, Россия

Поступила в редакцию 15.09.2023 г.

После доработки 17.10.2023 г.; принята к публикации 20.10.2023 г.

Представлены результаты обнаружения радиоизлучения от гамма-пульсара J1836+5925. В Пушчинской радиоастрономической обсерватории на радиотелескопе БСА ФИАН на частоте 111 МГц были зарегистрированы редкие события радиоизлучения от этого объекта. Особенности радиоизлучения пульсара J1836+5925 являются двух-трех компонентный интегральный профиль и очень узкие индивидуальные импульсы. Возможно также наличие интеримпульса. Измерена мера дисперсии $DM = 23 \pm 1$ пк/см³ и дана оценка расстояния до пульсара, 1.5 кпк. Получена оценка плотности потока и нижнего предела на спектральный индекс.

Ключевые слова: радиотихие пульсары, гамма-пульсары, обнаружение радиоизлучения.

DOI: 10.31857/S0320010823100029, EDN: 0IKPFX

1. ВВЕДЕНИЕ

Среди пульсаров, обнаруженных по наблюдениям Fermi LAT (см., например, Абдо и др., 2010), выделяют группу гемингаподобных пульсаров. Это малочисленная группа из нескольких объектов, выделенная по свойствам излучения в гамма- и рентгеновском диапазонах. Исследование гамма-пульсаров в радиодиапазоне очень важно для определения модели излучения пульсара, поскольку соотношение между радиотихими и радиогромкими пульсарами может наложить ограничения на модели излучения. Близкий гамма-пульсар Геминга, давший название выделенной группе, является уникальным объектом. Это один из ярчайших источников на гамма-небе и всеволновой пульсар, излучающий также в рентгене, оптике и радио.

Следующий яркий гамма-источник J1836+5925 был обнаружен во время миссии EGRET (Лин и др., 1994, а позже Нолан и др., 1994). Долгое время он не был идентифицирован в других диапазонах. После того как в работах Реймер и др. (2000, 2001) и Мирабал и др. (2001) была высказана идея, что это нейтронная звезда типа Геминги, появился ряд работ по поиску периодического излучения от гамма до радио, например, Халперн и др. (2002, 2007). В 2010 г. был обнаружен период (173 мс) этого пульсара в гамма- (Абдо и др., 2010), а затем

и в рентгеновском (Павлов, 2014; Арумугасами и др., 2014) диапазонах. Часть авторов относят Гемингу к радиотихим (quiet) пульсарам, хотя еще в 1997–1998 гг. три группы из ПРАО сообщили об обнаружении слабого радиоизлучения от этого объекта на частоте 102 МГц (Кузьмин, Лосовский, 1997; Малофеев, Малов, 1997; Шитов, Пугачев, 1998). Затем наличие радиоизлучения было подтверждено на близкой частоте 103 МГц (Ватс и др., 1999), а также был обнаружен слабый источник непрерывного излучения на частоте 4.8 ГГц (Пеллицони и др., 2011). В наших работах (Малофеев, Малов, 2000; Малов и др., 2015) были представлены данные по параметрам уникального пульсара Геминга на четырех низких частотах: 111, 87, 62 и 42 МГц. Наконец, в работе Маан (2015) представлены данные по отдельным сильным всплескам на частоте 34 МГц.

Учитывая схожесть обоих гамма-пульсаров, начиная с 2016 г., мы предприняли ряд попыток найти радиоизлучение от J1836+5925 на радиотелескопе БСА ФИАН на частоте 111 МГц. В работе Малова и Тимиркеевой (2018) было высказано предположение о том, что гамма-пульсары с сильными магнитными полями на световом цилиндре и высокими скоростями потерь энергии вращения могут также излучать в радиодиапазоне, и представлен список наиболее вероятных кандидатов для поиска в радиодиапазоне. Гамма-пульсар J1836+5925 оказался в этом списке одним

* Электронный адрес: malofeev@prao.ru

из самых перспективных. Приняв во внимание это обстоятельство, с 2019 г. мы начали его регулярные наблюдения. Первые попытки поиска радиоизлучения от этого объекта были описаны в работе Тимиркеевой и др. (2021).

2. НАБЛЮДЕНИЯ И МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ

Наблюдения проводились в Пушинской радиоастрономической обсерватории на высокочувствительном радиотелескопе БСА ФИАН с эффективной площадью $45\,000\text{ м}^2$ на частоте $111 \pm 1.5\text{ МГц}$ с использованием стандартного 512-канального цифрового приемника с полосой 2.5 МГц с высоким частотно-временным разрешением (полоса пропускания одного канала — 4.88 кГц , временное разрешение — 2.4576 мс). Исходя из размера диаграммы направленности радиотелескопа по азимуту по половинной мощности, продолжительность сеанса наблюдений для исследуемого пульсара составляет около $3.3\text{ мин}/\cos\delta = 6.4\text{ мин}$. При периоде пульсара 173 мс мы можем наблюдать 2220 периодов за сеанс. Для повышения достоверности результата при поиске слабого сигнала мы вели запись группами по три периода пульсара, т.е. наблюдательный период $P_{\text{obs}} = 3P_0$, где P_0 — период вращения пульсара. В нашем случае $P_{\text{obs}} = 519.798\text{ мс}$ и при временном разрешении 2.4576 мс в группе мы имеем 211.5 временных отсчетов или 70.5 отсчетов на период вращения. Запись сигнала проводилась в 726 группах с периодом P_{obs} за один сеанс в 460 частотных каналах. При накоплении таких групп за сеанс наблюдений мы должны наблюдать не один интегральный импульс, а три с фазами прихода, отстоящими на расстояние, равное периоду вращения. Обработка заключалась в суммировании сигнала во всех 460 каналах с выбранной мерой дисперсии в каждой группе с подключением одного или двух сглаживающих фильтров с использованием текущего среднего и экспоненциального усреднения как по времени, так и по частоте. Эта процедура позволяла увеличить отношение S/N на динамическом спектре. Далее для поиска интегрального сигнала проводилось суммирование в выбранном числе групп (вплоть до 726), и анализировалась каждая группа для поиска индивидуальных импульсов. Кроме того, поскольку сигнал ожидался слабым, и мы не знали априори характер излучения источника, то использовалась также методика селективного поиска отдельных импульсов с заданным отношением S/N на выбранной фазе P_{obs} с последующим накоплением. Фаза накопления выбиралась по затравочному импульсу с отношением $S/N \geq 3$ в интегральном периоде P_{obs}

или его свертке с периодом P_0 . Другой затравочной фазой может быть фаза прихода сильного индивидуального импульса с отношением $S/N \geq 4$. Наличие сигнала определялось по двум критериям: 1) появлению двух или трех импульсов в окне наблюдения P_{obs} , отстоящих на период пульсара; 2) наличие треков на динамическом спектре. Эта методика неоднократно нами использовалась (см., например, Малофеев и др., 2007; Малов и др., 2015), и дала хорошие результаты. Надо заметить, что такая селекция хорошо работает при сильно переменном характере излучения, когда импульсы идут группами. При суммировании всех периодов импульс, как правило, очень слабый или отсутствует вовсе, а при накоплении импульсов с заметным отношением S/N в правильной фазе и с правильной мерой дисперсии растет и суммарный сигнал, и появляются один или даже два импульса в наблюдательном окне в фазах, разнесенных на период пульсара. Обработка одного сеанса наблюдений требовала нескольких часов работы, особенно на стадии поиска меры дисперсии.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Поиск пульсара проводился сериями по 7–14 дней и по 5–8 серий в год. В период с февраля 2019 г. по апрель 2023 г. было обработано 212 дней наблюдений. Было обнаружено пять записей наблюдений, в которых видны все три импульса при суммировании 726 групп с тройным периодом пульсара. Пример такой записи показан на рис. 1. На рис. 1а мы видим три слабых импульса с отношением S/N около 3 , отстоящих на период пульсара. На рис. 1б показан сигнал после свертки с периодом пульсара, где величина S/N равна 4.2 .

Прежде чем получить этот результат, мы должны были найти правильную меру дисперсии. Разброс оценок мер дисперсии (DM) для J1836+5925 по оценкам расстояния до пульсара от 250 пк до 1.1 кпк (Каравео и др., 1996) находится в диапазоне $2\text{--}24\text{ пк/см}^3$ (Халперн и др., 2002, 2007). Мы искали импульсное излучение перебором мер дисперсии от 0 до 33 пк/см^3 либо в суммарных данных, либо по индивидуальным импульсам. В результате тщательного анализа была определена величина $DM = 23 \pm 1\text{ пк/см}^3$. На рис. 2 приведен пример отдельного импульса за 08.05.2021 с треком на динамическом спектре, соответствующим $DM = 24\text{ пк/см}^3$. Эта величина измеряется как

$$DM = \frac{2.41\Delta t(\text{с})}{1/\nu_1^2 - 1/\nu_2^2},$$

где Δt (в секундах) — задержка по времени между самой высокой ν_2 и самой низкой ν_1 частотами

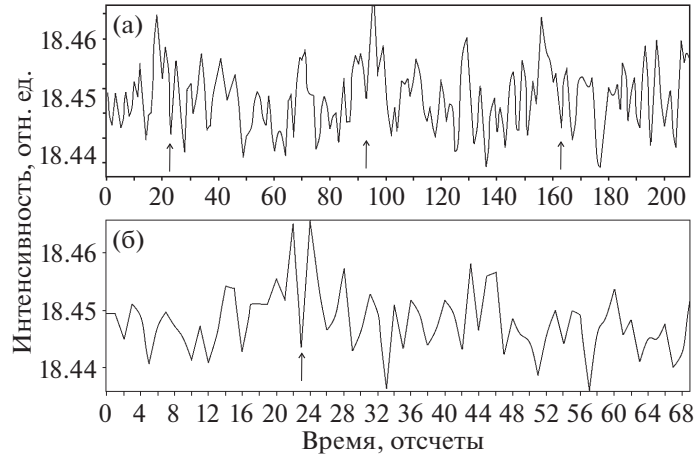


Рис. 1. (а) — Интегральный профиль импульса, полученный суммированием 725 тройных периодов по наблюдениям 08.12.2021 г. Мера дисперсии 23 пк/см^3 , отношение сигнала к шуму $S/N = 4.2$; (б) — профиль импульса, полученный сверткой окна, показанного на графике (а) в один период пульсара (P_0). Стрелками отмечен период пульсара. По горизонтальной оси отложены отсчеты в пределах окна $P_{\text{obs}} = 3P_0$. Временной интервал между отсчетами равен 2.4576 мс , период пульсара равен 70.5 отсчетов. По вертикальной оси — интенсивность в относительных единицах.

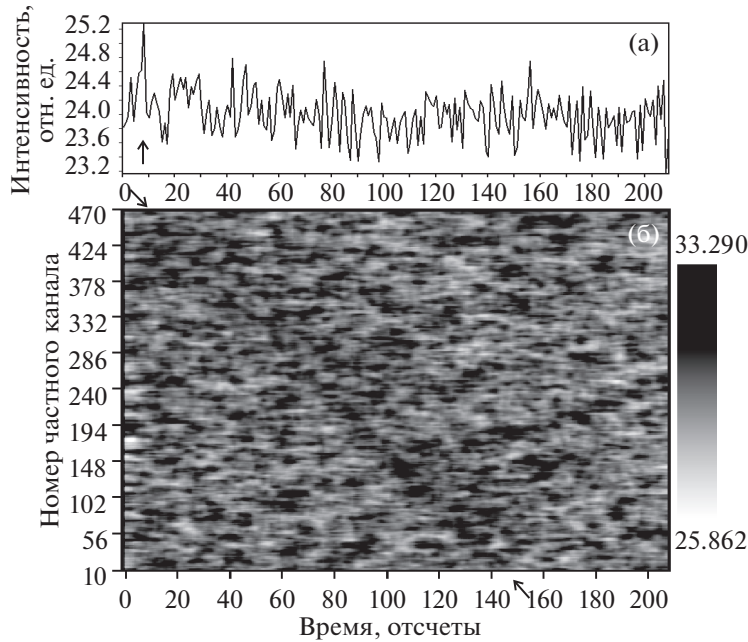


Рис. 2. (а) — Индивидуальный импульс, группа № 400 по наблюдениям 08.05.2021 г., $DM = 24 \text{ пк/см}^3$, $S/N = 5.3$; (б) — динамический спектр. По горизонтальной оси то же, что и на рис. 1, по вертикальной (а) то же, что и на рис. 1; (б) — номера частотных каналов от 10 до 470. Стрелками показаны фаза импульса и трек дисперсионного запаздывания на динамическом спектре. Шкала интенсивности динамического спектра в относительных единицах добавлена справа.

(ν в сотнях МГц). На рис. 3 приведен пример интегральных профилей пульсара J1836+5925 за 08.12.2021 г. на разных DM от 18 до 28 пк/см^3 в окне, равном периоду пульсара P_0 . Масштабирование по вертикальной оси было проведено по σ шумов. На рисунке видно, что только на $DM = 22, 23, 24$ появляется заметный импульс с S/N больше 3. Более детальный анализ зависимости отношения S/N и ширины интегрального импульса

по половинной мощности сигнала W_{50} от меры дисперсии показан на рис. 4 для двух дней наблюдений. Несмотря на разброс значений видно, что максимум значений $S/N = 4.2$ и минимум ширины $W_{50} \cong 12 \pm 2 \text{ мс}$ приходятся на $DM \cong 23 \pm 1 \text{ пк/см}^3$. Поскольку $DM = \int n_e dl$, то зная среднюю электронную плотность $\langle n_e \rangle$ в направлении на пульсар, мы можем определить расстояние до него. Единственный пульсар, близкий к нашему

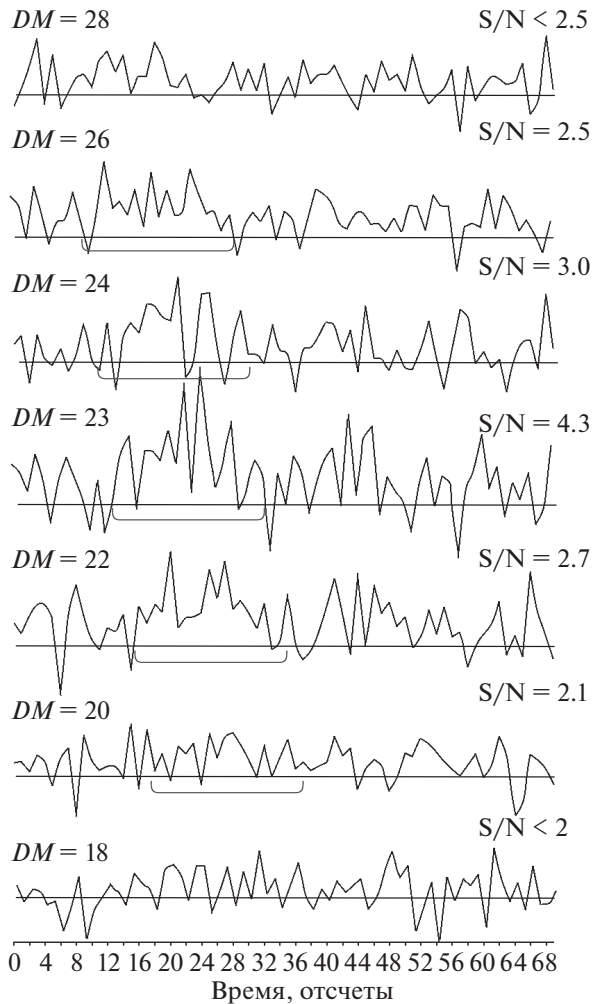


Рис. 3. Интегральные профили, полученные суммированием 726×3 периодов с разной мерой дисперсии от 18 до 28 пк/см³, с указанием отношения сигнала к шуму (S/N), по наблюдениям 08.12.2021 г. Скобкой показана фаза интегрального импульса. По осям то же, что и на рис. 1б.

по координатам и по DM , — это J1840+5640, имеющий $DM = 26.54$ пк/см³. При расстоянии до него, равном 1.69 кпк, мы можем получить среднюю электронную плотность 0.017 см⁻³ и оценить расстояние до нашего источника, которое оказывается равным 1.5 кпк. Это превышает верхние оценки расстояния в 0.8 и 1.1 кпк, приведенные в работах Халперн и др. (2002) и Каравео и др. (1996) соответственно.

Поскольку из 212 дней наблюдений в интервале четырех лет с 02.2019 г. по 04.2023 г. (в 2020 г. наблюдения не проводились) только в пяти записях нам удалось увидеть слабый сигнал при накоплении 726 тройных периодов, мы подключили накопление с селекцией, описанное в предыдущем разделе. Нам удалось найти еще 16 дней, когда при

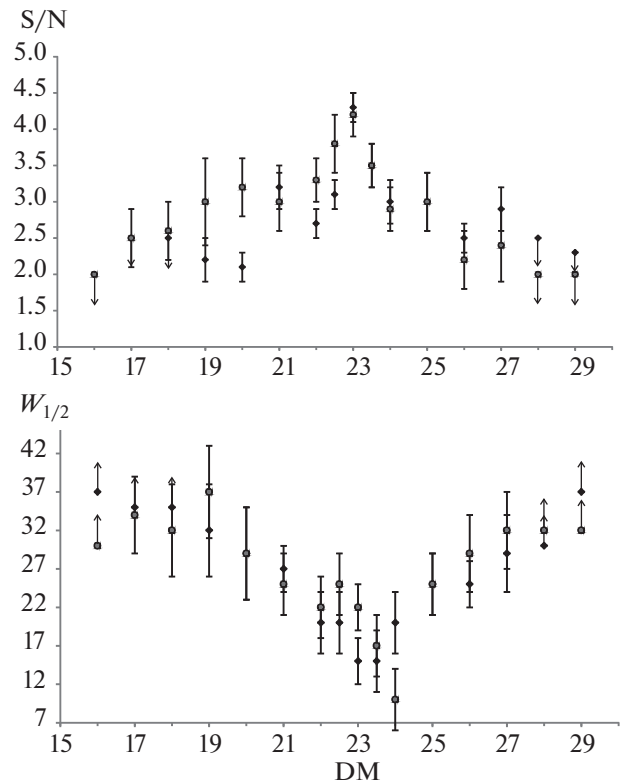


Рис. 4. Зависимость отношения сигнала к шуму (S/N) и полуширины интегрального импульса (W_{50}) от меры дисперсии по наблюдениям 08.12.2021 г. (черные ромбы) и 17.02.2023 г. (серые круги).

накоплению сигнала в выбранной фазе проявляются один или два импульса в окне наблюдения, отстоящих на P_0 с треками на динамическом спектре. Такой пример приведен на рис. 5а, когда при суммировании 86 тройных периодов в фазе 115–135 с $S/N \geq 2.5$ появляются еще два более слабых интегральных импульса, отстоящих на P_0 . На динамическом спектре видны дисперсионные треки этих импульсов. Таким образом, можно заключить, что радиопульсар J1836+5925, так же как пульсар Геминга (Малофеев, Малов, 1997; Малов и др., 2015), демонстрирует как долговременные (десяtkи дней, месяцы), так и кратковременные (группы по нескольку импульсов) вариации интенсивности.

Форма интегрального импульса получена в результате обработки нескольких удачных сеансов с селективным накоплением сигнала. На рис. 6а приведен интегральный профиль за 03.03.2021 г. при суммировании 45 групп, когда сигнал с отношением $S/N \geq 2.5$ присутствовал во всех трех фазах: 20–40, 90–110, 160–180, т.е. в трех периодах подряд. На рис. 6б представлена свертка с одним периодом, на которой виден двухкомпонентный профиль. На следующем рис. 2в приведена такая же свертка за другой день наблюдений и с другим количеством

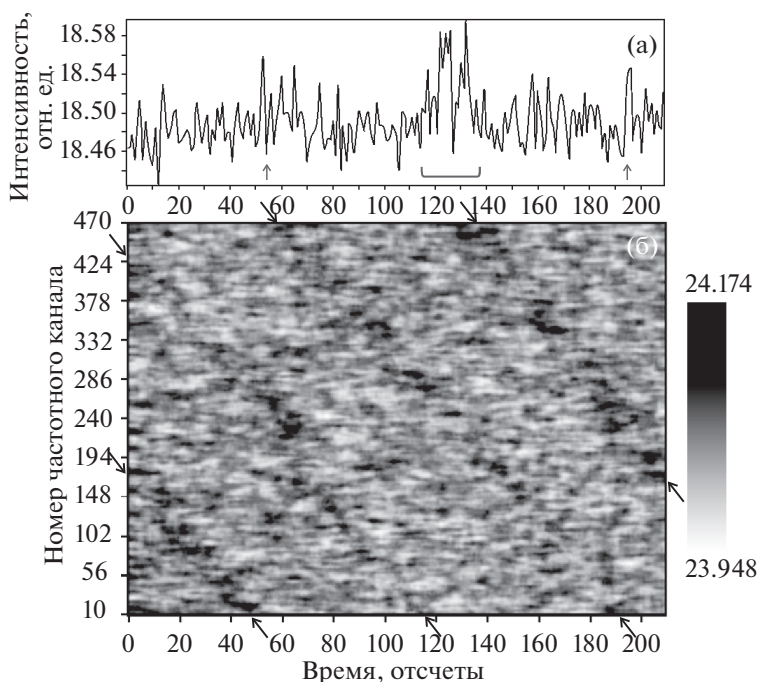


Рис. 5. (а) — Профили импульсов, полученные суммированием 86 выбранных групп импульсов с тройным периодом пульсара ($P_{\text{obs}} = 3P_0$). Интегрирование проведено в фазе 115–135, $DM = 23$ пк/см³; (б) — динамический спектр на частоте 111 МГц по наблюдениям 07.03.2021 г. По горизонтальным и вертикальным осям отложено то же, что и на рис. 2. Стрелками показаны треки дисперсионного запаздывания. Шкала интенсивности динамического спектра в относительных единицах добавлена справа.

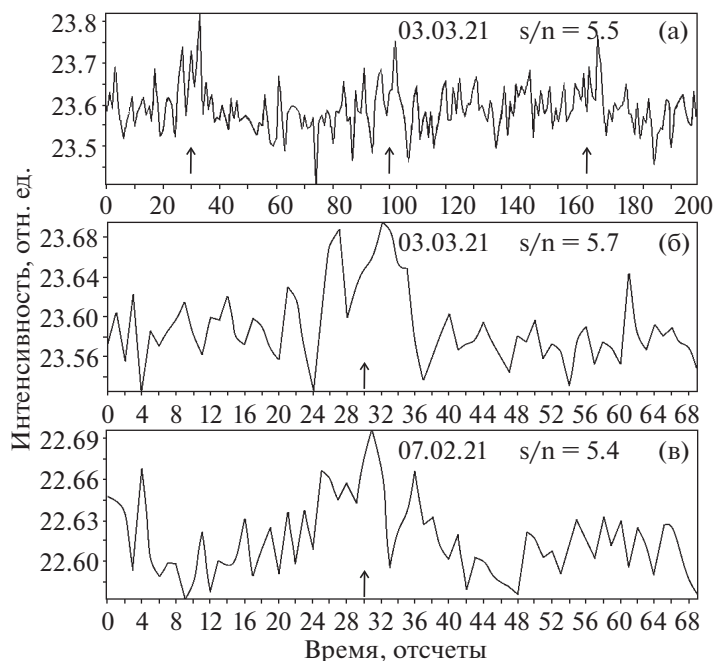


Рис. 6. (а) — Интегральный профиль импульса, полученный суммированием 45 выбранных групп импульсов с $P_{\text{obs}} = 3P_0$ по наблюдениям 03.03.2023 г., $S/N = 5.5$; (б) — профиль импульса, полученный сверткой окна, показанного на графике (а) в один период пульсара ($45 \times 3 = 135$ импульсов), $S/N = 5.7$; (в) — профиль импульса, полученный сложением 264 индивидуальных импульсов, по наблюдениям 07.02.2021 г., $S/N = 5.4$. Стрелками отмечены фазы, соответствующие периоду пульсара. По осям те же обозначения, что и на рис. 1.

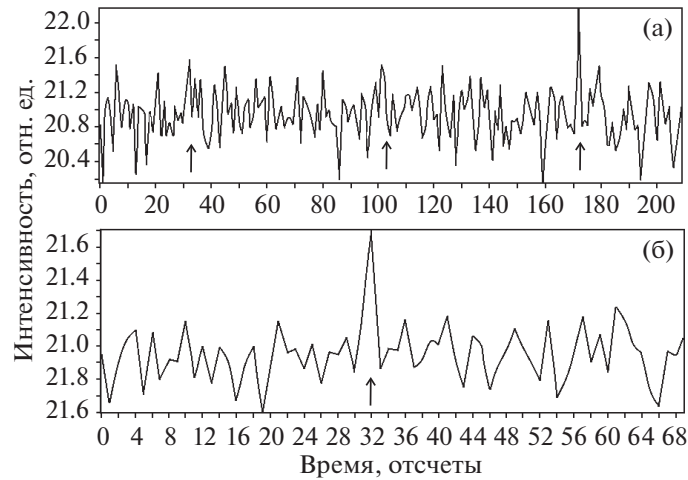


Рис. 7. (а) — Индивидуальные импульсы (группа № 107) по наблюдениям 03.03.2021 г., $DM = 23$ пк/см³, $S/N = 4.9$; (б) — профиль импульса, полученный сверткой окна, показанного на графике (а) в один период пульсара, $S/N = 6.5$. Стрелками отмечены фазы, соответствующие периоду пульсара. По осям те же обозначения, что и на рис. 1.

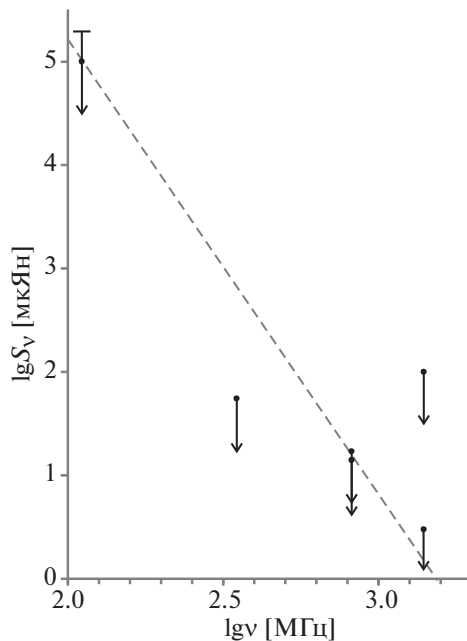


Рис. 8. Спектр. Данные на частотах 318, 820 и 1400 МГц взяты из работ Абдо и др. (2010), Халперн и др. (2002, 2007), на частоте 111 МГц — из настоящей работы.

суммарных периодов. Здесь мы видим три компонента импульса с близкой шириной. По-видимому, интегральный профиль пульсара сложный и состоит из двух-трех компонент с близкой амплитудой, шириной около 9 мс и расстоянием между ними около 12 мс.

В отличие от интегрального профиля, индивидуальные импульсы, как правило, узкие (ширина 3–8 мс либо уже, так как временной отсчет равен 2.4576 мс). Пример таких импульсов показан на рис. 2а и 7. На последнем рисунке виден один сильный узкий импульс с отношением $S/N = 5$ и

два более слабых, разнесенных на P_0 . На рис. 7б показана свертка трех периодов и суммарный узкий импульс с $S/N = 6.5$. За 212 дней наблюдений было найдено около 50 индивидуальных импульсов с $S/N \geq 5$ и слабым треком на динамическом спектре, что составляет примерно 0.01% от общего числа импульсов.

Кроме основного импульса в наших наблюдениях неоднократно появлялся редкий интеримпульс в фазе, отстоящей на полпериода от главного импульса, причем это было обнаружено как в интегральных, так и индивидуальных импульсах.

На рис. 2 приведен пример такого интеримпульса. В гамма-диапазоне наблюдается интеримпульс, сравнимый с главным импульсом и отстоящий от него на полпериода (Абдо и др., 2010).

По наблюдениям за 21 день, когда виден интегральный импульс, мы оценили среднюю плотность потока за период пульсара $S_\nu = 100 \pm 20$ мЯн. Для 191 дня, когда мы не видим сигнала на уровне 3σ шумов, оценка плотности потока оказывается равной $S_\nu < 60$ мЯн. Эти оценки вместе с верхними оценками на трех частотах дециметрового диапазона представлены на рис. 8. Мы можем сделать оценку спектрального индекса радиоизлучения. При плотности потока 100 мЯн на частоте 111 МГц и верхней оценке $S_\nu < 14$ мкЯн на частоте 820 МГц из работы Абдо и др. (2010) получим $\alpha > 3.4$, если плотность потока изменяется с частотой как $S_\nu^{-\alpha}$. Это значение существенно превышает оценку среднего спектрального индекса для пульсаров (см., например, Малофеев и др., 2000; Билоус и др., 2016), где приводится значение $\alpha = 1.4$ в диапазоне 102–400 МГц для 175 и 124 пульсаров соответственно. Это близко к оценке спектрального индекса для Геминги $\alpha > 5$ в диапазоне 87–430 МГц (Малофеев, 1999).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- У гамма-пульсара J1836 + 5925 обнаружено слабое, периодическое, импульсное излучение на частоте 111 МГц.
- Излучение сильно переменное и проявляется в 10% случаев при накоплении сигнала и примерно в 0.01% индивидуальных импульсов.
- Измерена мера дисперсии $DM \cong 23 \pm 1$ пк/см³. Оценено расстояние до пульсара, которое оказалось равным 1.5 пк.
- Интегральный профиль занимает около 20% от периода и состоит из двух-трех компонент. Индивидуальные импульсы, как правило, узкие (3–8 мс, что составляет 2–5% от периода).
- Измерена плотность потока на частоте 111 МГц $S_\nu = 100 \pm 20$ мЯн и дана нижняя оценка спектрального индекса $\alpha > 3.4$.
- Вероятно наличие интеримпульса, отстоящего на полпериода от главного импульса.

Авторы выражают благодарность И.Ф. Малову за полезные дискуссии и С.В. Логвиненко за помощь в проведении наблюдений и обработку результатов.

В.М. Малофеев благодарен гранту РНФ № 23-62-100043 за частичную поддержку по автоматизации процесса обработки данных, а М.А. Тимиркеева выражает благодарность гранту РНФ № 22-12-00236 за частичную поддержку работы по поиску радиоизлучения от гамма-пульсаров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдо и др. (A.A. Abdo, M. Ackermann, M. Ajello, W.B. Atwood, L. Baldini, J. Ballet, G. Barbiellini, M.G. Baring, et al.), *Astrophys. J.* **712**, 2109 (2010).
2. Арумугасами и др. (P. Arumugasami, G. Pavlov, and J. Blake), 40th COSPAR Scientific Assembly. Held 2–10, August 2014. Moscow, Russia (2014).
3. Билоус и др. (A.V. Bilous, V.I. Kondratiev, M. Kramer, E.F. Keane, J.W.T. Hessels, B.W. Stappers, V.M. Malofeev, C. Sobey, et al.), *Astron. Astrophys.* **5911**, 134B (2016).
4. Ватс и др. (H.O. Vats and A.K. Cigal, M.R. Deshpande, K.N. Iyer, R. Oza, Ch.R. Shah, and S. Doshi), *MNRAS* **302**, L65 (1999).
5. Каравео и др. (P.A. Caraveo, G.F. Bignami, J.E. Trumper, and E. Joachim), *Astron. Astrophys. Rev.* **7**, 209 (1996).
6. Кузьмин А.Д., Лосовский Б.Я., Письма в Астрон. журн. **23**, 323 (1997) [A.D. KuztAЩmin and B.Ya. Losovskii, *Astron. Lett.* **23**, 283 (1997)].
7. Лин и др. (Y.C. Lin, J. Chiang, J. Fierro, et al.), *IAU Circ.* **5676**, 360 (1994).
8. Маан (Y. Maan), *Astrophys. J.* **815**, 126 (2015).
9. Малов О.И., Малофеев В.М., Теплых Д.А., Логвиненко С.В., *Астрон. журн.* **92**, 112 (2015).
10. Малов, Тимиркеева (I.F. Malov and M.A. Timirkееva), *Res. Astron. Astrophys.* **18**, 84 (2018).
11. Малофеев, Малов (V.M. Malofeev and O.I. Malov), *Nature* **389**, 697 (1997).
12. Малофеев В.М., Малов О.И., *Астрон. журн.* **77**, 52 (2000).
13. Малофеев (V.M. Malofeev), *Colloquium Physics on Neutron Stars: P. 29*, St. Peterburg (1999).
14. Малофеев В.М., Малов О.И., Щеголева Н.В., *Астрон. журн.* **77**, 499 (2000).
15. Малофеев и др. (V. Malofeev, O. Malov, and D. Teplykh), *Astrophys. Space Sci.* **308**, 211 (2007).
16. Малофеев В.М., Теплых Д.А., Логвиненко С.В., *Астрон. журн.* **89**, 38 (2012).
17. Мирабал и др. (V. Mirabal, J. Halpern, M. Eracleous, and R.H. Becker), *Astrophys. J.* **541**, 180 (2000).
18. Мирабал, Халперн (V. Mirabal and J. Halpern), *Astrophys. J.* **547**, L.137 (2001).
19. Нолан и др. (P.L. Nolan, J.M. Fierro, Y.C. Lin, P.F. Michelson, T.D. Willis, J. Chiang, D.L. Bertsch, B.L. Dingus, et al.), *AIP Conf. Proc.* **304**, 360 (1994).
20. Павлов (G. Pavlov), *NASA Proposal id 14-ADAP14-220* (2014).

21. Пеллицони и др. (A. Pellizzoni, F. Govoni, P. Esposito, M. Murgia, and A. Possenti), *MNRAS* **416**, L45 (2011).
22. Реймер и др. (O. Reimer, K.T.S. Brazier, A. Caraminana, G. Kanbach, P.L. Nolan, and D.J. Thompson), *MNRAS* **324**, 772 (2001).
23. Реймер и др. (O. Reimer, K.N.S. Brazier, A. Caraminana, G. Kanbach, P.L. Nolan, and D.J. Thompson), *AIP Conf. Ser.* 510, Ed. M.L. McConnell and Y.M. Ryan (New York), 489 (2000).
24. Тимиркеева и др. (M. Timirkееva, I. Malov, V. Malofeev, and O. Malov), *Open Astron.* **30**, 119 (2021).
25. Халперн и др. (J.P. Halpern, E.V. Gotthelf, N. Mirabal, and F. Camilo), *Astrophys. J.* **573**, L41 (2002).
26. Халперн и др. (J.P. Halpern, F. Camilo, and E.V. Gotthelf), *Astrophys. J.* **668**, 1154 (2007).
27. Шитов, Пугачев (Yu. Shitov and V. Pugachev), *New Astron.* **3**, 101 (1998).