

ПОИСК СЛАБЫХ КОМПОНЕНТОВ В ИЗЛУЧЕНИИ ПУЛЬСАРОВ

© 2024 г. Т. В. Смирнова¹, М. О. Торопов², С. А. Тюльбашев^{1,*}

¹Физический институт им. П. Н. Лебедева, Астрокосмический центр,
Пущинская радиоастрономическая обсерватория, Пущино, Московская обл., Россия

²LLC TEK Inform, Москва, Россия

E-mail: serg@prao.ru

Поступила в редакцию 23.05.2024 г.

После доработки 02.09.2024 г.

Принята в печать 11.09.2024 г.

Проведен поиск слабых компонентов вне главного импульса (ГИ) в излучении пульсаров на частоте 110 МГц, наблюдавшихся на телескопе БСА ФИАН в Пущинском многолучевом поиске пульсаров (PUMPS). Выборка включала 96 пульсаров, для которых отношение сигнала к шуму в главном импульсе среднего профиля при накоплении за 10 лет было больше 40. Было обнаружено, что PSR J1543+0929 имеет излучение практически весь период. Профиль является трехкомпонентным. Относительные амплитуды боковых слабых компонентов составляют 0.013 и 0.025. Для PSR J2234+2114 был обнаружен предимпульс, отстоящий от ГИ на 53°.

Ключевые слова: пульсары, средние профили, протяженное излучение

DOI: 10.31857/S0004629924120059 EDN: ICPVYP

1. ВВЕДЕНИЕ

Большинство пульсаров имеет радиоизлучение в узком конусе, и типичная ширина средних профилей, полученных накоплением нескольких сотен или даже тысяч импульсов, составляет 5–10% от периода пульсара P . Хотя индивидуальные импульсы имеют разные формы, средний профиль для данного пульсара обычно очень стабилен на данной частоте [1, 2]. Однако существуют пульсары с переключением мод (PSR B0943+10, B1237+25 и другие), когда форма профиля дискретным образом меняется [3]. Наблюдаемая форма импульса существенно зависит от размера и структуры излучающей области, а также от угла между направлением на наблюдателя и центром конуса излучения.

Наблюдаемые формы средних профилей могут быть как однокомпонентными (например, для PSR B1933+16), так и многокомпонентными (PSR B1237+25 имеет 5 компонентов). В очень редких случаях пульсары показывают излучение в течении всего периода. Так пульсар B0826–34 имеет излучение в области 250° (69% периода) на метровых волнах и в течении не менее 70% времени его излучение не видно (нуллинги) [5, 4]. Для пульсара B0950+08 излучение детектируется также практически весь период [6, 7, 8]. Это предполагает, что угол между магнитной осью и осью вращения мал (соосный ротатор) и направление на наблюдателя находится все время внутри области излучения. У ряда пульсаров наблюдаются

импульсы на расстоянии примерно 180° от главного импульса (ГИ). Эти импульсы называют интеримпульсами и они обычно имеют существенно меньшую амплитуду по сравнению с ГИ. Пульсары с интеримпульсами могут быть как соосными, так и ортогональными ротаторами. В случае ортогонального ротатора наблюдатель может видеть излучение с обоих магнитных полюсов. Для того, чтобы различить случаи соосного или ортогонального ротаторов могут быть использованы поляризационные измерения [9].

Целью настоящей работы является поиск слабых компонентов в радиоизлучении пульсаров вне главного импульса по выборке пульсаров, наблюдаемых в Пущинском многолучевом поиске (PUMPS) [10].

2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА

Мониторинговые наблюдения проводятся на Большой Синфазной Антенне (БСАЗ) Физического института им. П. Н. Лебедева (ФИАН) по программе поиска пульсаров и транзиентов начиная с августа 2014 г. Мы использовали эти данные в нашей работе. Антenna принимает линейно-поляризованное излучение. Центральная частота наблюдений 110.3 МГц, полоса приема 2.5 МГц. 128 лучей антенны выстроены в плоскости меридиана и покрывают склонения от −9° до +55° с перекрытием лучей по уровню 0.4. Время прохождения через меридиан по половинной мощности (сессия наблюдений) составляет около 3.5 мин. В настоящей работе был использован 32-ка-

нальный приемник с шириной канала в 78 кГц. Время опроса точки 12.5 мс. Для калибровки сигнала в частотных каналах использовалась калибровочная ступенька с известной температурой (сигнал от генератора шума), которая записывалась 6 раз/день. По калибровочным ступенькам при дальнейшей обработке выравнивалось усиление сигнала в разных сеансах и во всех частотных каналах [11]. За 10 лет круглосуточного мониторинга для каждого пульсара накоплено около 3000 наблюдательных сессий.

Данные регистрировались на диск часовыми порциями во всех частотных каналах. Из часовой записи выбиралась часть, соответствующая времени прохождения данного пульсара через диаграмму антенных по уровню половинной мощности. Первичная обработка данных включала: калибровку сигнала по калибровочной ступеньке таким образом, чтобы усиление во всех каналах было одинаковым, вычитание базовой линии, компенсация меры дисперсии (DM), запись всех импульсов во всех каналах на диск.

Средний профиль для каждого сеанса получался после компенсации DM сложением всех записей импульсов с заданным периодом P . Если отношение сигнала к шуму (S/N) в главном импульсе было меньше 8, сессия отбрасывалась. Для оставшихся сессий в каждом среднем профиле проводился циклический сдвиг таким образом, чтобы главный импульс был в первой четверти периода. Таким образом, фаза ГИ во всех сеансах была одной и той же, поэтому можно было складывать средние профили за каждый сеанс,

чтобы получить средний профиль за все отобранные сеансы данного года. Делалась оценка среднеквадратичного шума вне импульса σ_n . Кроме того, формировались файлы с записями импульсов каждого сеанса и среднего профиля за данный сеанс. Затем профили всех сеансов за каждый год суммировались и мы получали средние профили по годам, а также суммарный средний профиль за все годы. Для анализа данных использовалась выборка из 96 пульсаров, для которых отношение S/N в главном импульсе среднего профиля при накоплении за 10 лет (2014–2023) было больше 40. В работе [12, табл.1] приведены названия этих пульсаров, период и мера дисперсии.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И АНАЛИЗ

Анализ профилей 96 пульсаров, полученных за 10 лет наблюдений, позволил обнаружить 12 пульсаров с интеримпульсами, причем у 9 пульсаров интеримпульсы обнаружены впервые [12]. У 82 пульсаров новых деталей (особенностей) в суммированных средних профилях не найдено. У двух пульсаров (J1543+0929 и J2234+2114) наблюдались необычные детали в профилях, и мы анализируем их в данной работе.

3.1. J1543+0929

У пульсара J1543+0929 (B1541+09) обнаружено излучение практически в течение всего периода. На рис. 1 показан суммарный средний профиль J1543+0929 за все годы наблюдения с двойным периодом. Видно, что лишь в небольшой части

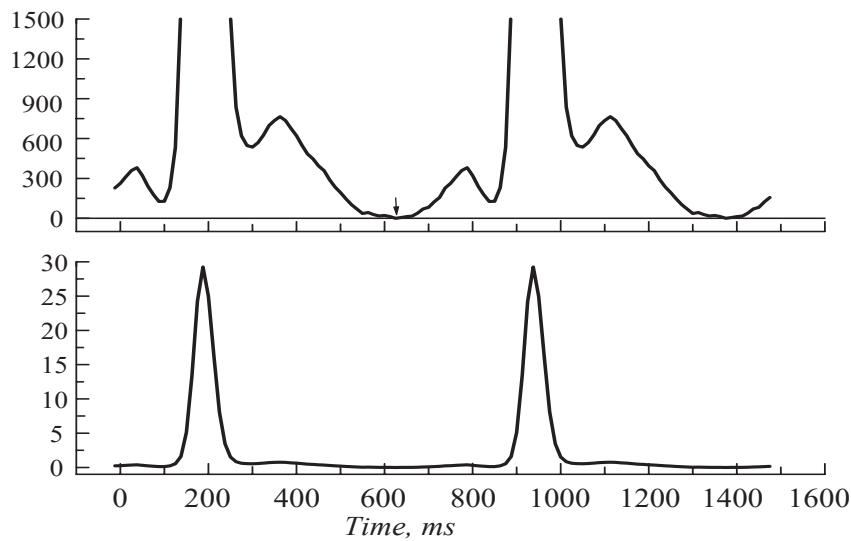


Рис. 1. Накопленные за 10 лет средние профили (2883 сеанса) пульсара J1543+0929 приведены с двойным периодом. Внизу — оригинальный профиль, вверху — тот же профиль с амплитудой, увеличенной в 1000 раз. На верхней части рисунка хорошо виден прекурсор и посткурсор. Стрелка показывает минимум излучения, занимающий несколько точек в профиле. Ось x — время в мс, ось y — амплитуда профиля в относительных единицах.

среднего профиля (меньше 10% от полного периода) излучение отсутствует. Минимум, отмеченный на рисунке стрелкой, находится на расстоянии 115° (638 мс) от главного импульса. Линия среднего профиля выглядит очень гладкой за счет усреднения большого количества профилей. Величина среднеквадратичного отклонения на суммированном профиле сравнима с шириной линии. Полученная картина наблюдаемого почти во всем периоде излучения J1543+0929 не случайная. На рис. 2 приведены средние профили за четыре последовательных года. Все накопленные за год профили являются стабильными и имеют одну и ту

же область минимальной амплитуды длительностью, примерно, в 70 мс. За 2018–2023 гг. профили имеют аналогичный вид. Какой либо временной эволюции среднего профиля от года к году не наблюдается. У этого пульсара имеется также два боковых компонента: предимпульс (прекурсор) и послеимпульс (посткурсор).

Ранее средние профили J1543+0929 были получены разными авторами в широком диапазоне частот, от 65 МГц до 4750 МГц, они приведены в базе данных пульсарных профилей¹. Для сравнения приведем профили на частоте 139.2 МГц [13] и на частоте 327 МГц [9], взятые из этой базы данных.

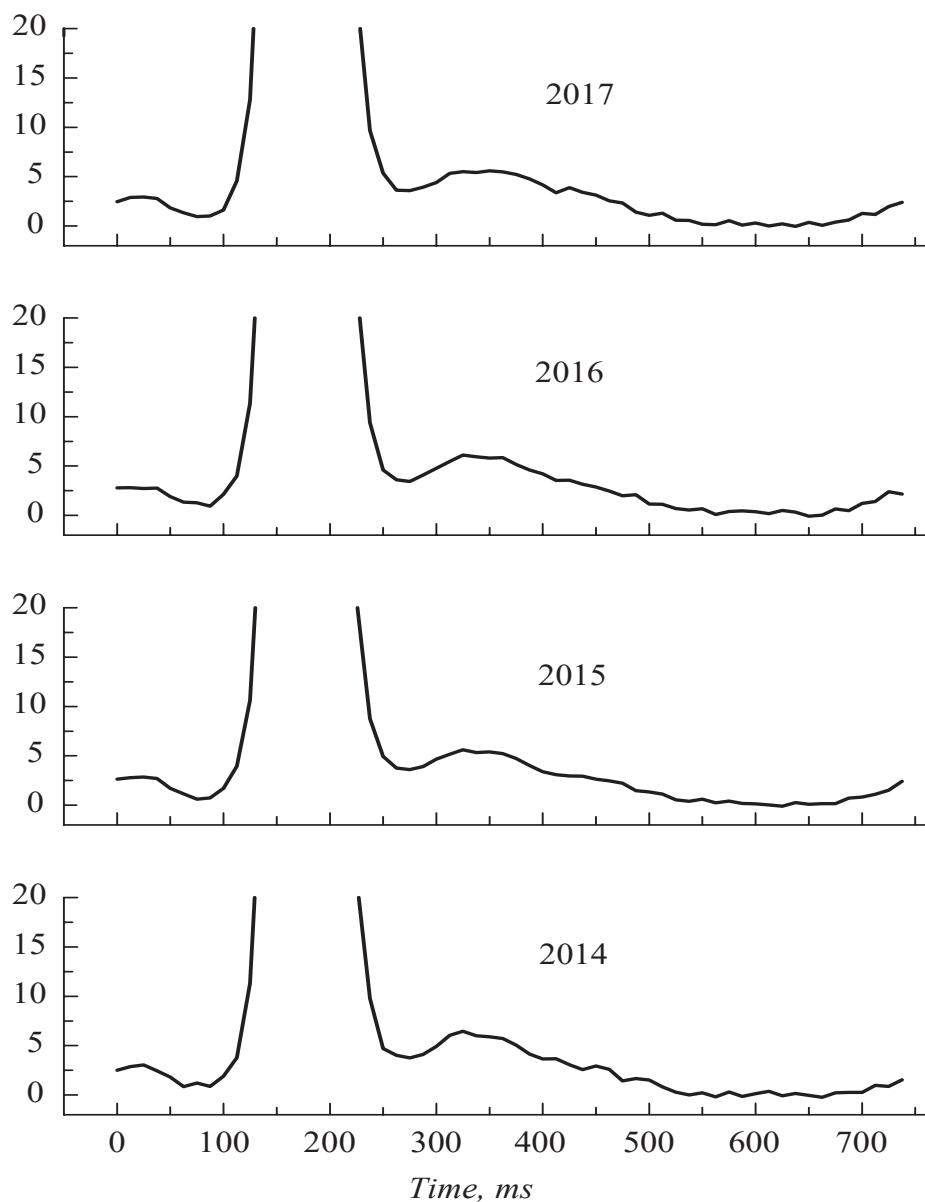


Рис. 2. Накопленные за каждый из четырех лет средние профили J1543+0929. Оси x и y соответствуют обозначениям рис. 1.

Они показаны на рис. 3. На частоте 139.2 МГц $t_1 = -140$ мс (-67.4° , расстояние от долготы максимума ГИ), $t_2 = +155$ мс ($+74.6^\circ$), $A_1 = 0.02$, $A_2 = 0.025$ [13]. На этой частоте расстояния от ГИ, t_1 и t_2 , совпадают с полученным нами с точностью до ошибок измерений, если учесть, что разрешение у нас 12.5 мс и дисперсионное размазывание в полосе канала 17.5 мс. Соотношение амплитуд компонентов примерно одинаковое. На частоте 327 МГц относительные амплитуды возрастают и A_2 : $A_1 = 2.3$, а расстояния от ГИ уменьшаются: $t_1 = -111$ мс (-53.4°), $t_2 = +134$ мс ($+64.5^\circ$) [9]. Увеличение расстояния между ГИ и боковыми компонентами с понижением частоты обычно связывается с тем, что излучение на более низких частотах идет с более высоких уровней от поверхности нейтронной звезды, что соответ-

входил и пульсар J1543+0929. Анализ ширин компонентов профиля и поведение угла поляризации с долготой позволило в этой работе оценить угол между магнитной осью и осью вращения α и импакт-угол β , под которым линия на наблюдателя сечет конус излучения. Для J1543+0929 угол $\alpha = 6^\circ$ и $\beta = -2.20^\circ$. Угол β мал и это означает практически центральное сечение конуса излучения, наблюдатель видит все три компонента профиля. Так как угол между магнитной осью и осью вращения мал, наблюдатель может видеть излучение практически весь период. Однако это излучение для J1543+0929 впервые удалось обнаружить лишь в настоящей работе.

Открытие межимпульсного излучения связано в первую очередь с очень высоким S/N в накопленном за многие годы среднем профиле. Уровень об-

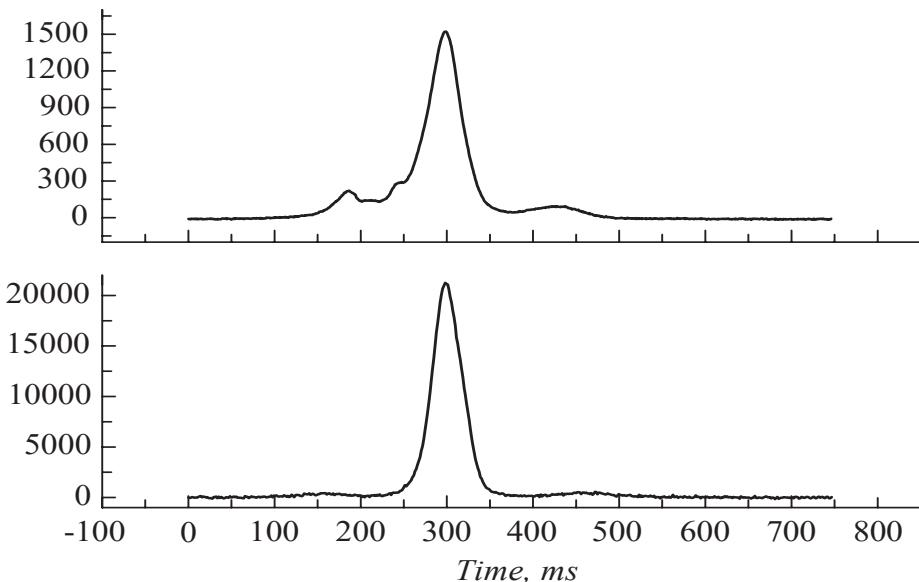


Рис. 3. Средние профили J1543+0929 на частотах 139.2 МГц (внизу) и 327 МГц (вверху), взятые из базы данных профилей пульсаров (см. текст). Ось x — время в мс, ось y — амплитуда в относительных единицах.

ствует расширению конуса магнитных силовых линий [14] и, следовательно, увеличению расстояния между компонентами.

На низких частотах профиль J1543+0929 является трехкомпонентным и соответствует модели «согесон» классификации Рэнкин [15], в которой рассматривается конусообразная структура излучающей области, в центре которой расположена центральная область («core»). В работе [9] исследовались поляризационные свойства 46 пульсаров. В этот список

наруженного сигнала межимпульсного излучения в несколько раз ниже, чем уровень сигнала в прекурсоре и составляет доли процента от сигнала ГИ. Такой же эффект наблюдается и для пульсара B0953+09, что отмечалось во Введении.

3.2. J2234+2114

У пульсара J2234+2114 обнаружен прекурсор, который ранее не описывался. Суммарный средний профиль за 10 лет наблюдений для пульсара J2234+2114 показан на рис. 4. У него имеется предимпульс, находящийся на расстоянии -200 мс

¹ <https://psrweb.jb.man.ac.uk/epndb>

(-53°) от ГИ и относительную амплитуду 0.1. Имеются только 3 профиля для этого пульсара в базе данных профилей пульсаров¹: на частотах 148.9 МГц [13], 346.7 МГц [16] и 430 МГц [17]. На частоте 148.9 МГц профиль однокомпонентный с низким отношением S/N , а на 346.7 МГц и 430 МГц профили, по-видимому, трехкомпонентные с компонентами, переходящими один в другой без четкого разделения. Расстояние между крайним левым компонентом и максимумом профиля определить затруднительно, однако отношение его амплитуды к амплитуде максимума профиля совпадает со значением на 110 МГц. Возможно, этот компонент соответствует нашему предимпульсу.

В табл. 1 приведены параметры исследованных пульсаров: период P , мера дисперсии DM , число сеансов, участвовавших в накоплении за 10 лет наблюдений N , расстояние компонентов перед (знак «») и после (знак «+») главного импульса от максимума ГИ в мс (в скобках даны эти расстояния

в градусах), t_1 и t_2 соответственно, а также их относительные амплитуды A_1 и A_2 . Точность определения расстояния компонентов от ГИ в миллисекундах и в градусах, соответствует, примерно, одной точке среднего профиля (± 12.5 мс) или $\pm 6^\circ$.

Как видно из столбца 4, указывающего количество сессий, по которым были получены средние профили, рост S/N в главном импульсе при сложении всех профилей будет, примерно, в 55 раз больше по сравнению с одной сессией. Учитывая, что в метровом диапазоне эффективная площадь радиотелескопа БСА самая высокая в мире, дополнительный рост S/N приводит к выявлению новых деталей в средних профилях давно известных и хорошо исследованных пульсаров.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа суммарных за 10 лет средних профилей пульсаров J1543+0929 и J2234+2114 уда-

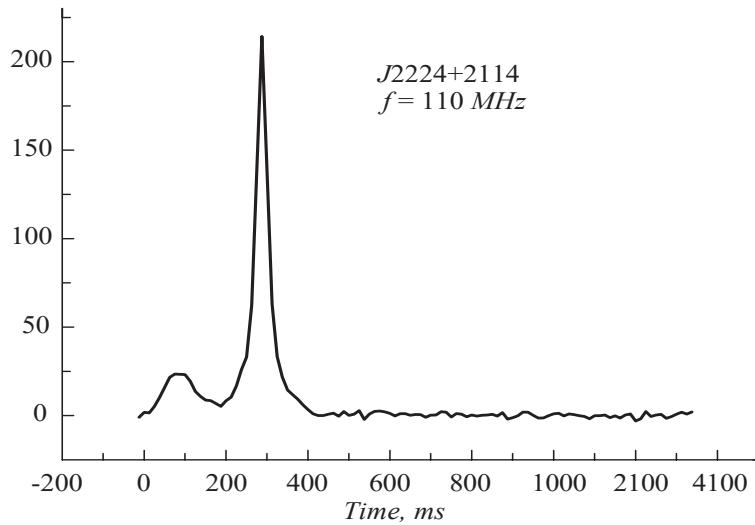


Рис. 4. Накопленные за 10 лет средние профили (3101 сеанса) J2234+2114. Ось x — время в мс, ось y — амплитуда профиля в относительных единицах.

Таблица 1. Параметры исследованных пульсаров на частоте 110 МГц

PSR	P , мс	DM , пк/см 3	N	t_1 , мс	t_2 , мс	A_1	A_2
J1543+0929	0.748	34.976	2883	-150 (-72°)	+175 (+84°)	0.013	0.025
J2234+2114	1.359	35.08	3101	-200 (-53°)	—	—	0.11

Примечание. Приведены: период пульсара P ; мера дисперсии DM ; число сеансов N , участвовавших в накоплении за 10 лет наблюдений; t_1 и t_2 — временное расстояние компонентов перед (знак «») и после (знак «+») главного импульса от максимума ГИ в мс (в скобках даны эти расстояния в градусах), а также их относительные амплитуды A_1 и A_2 .

¹ <https://psrweb.jb.man.ac.uk/epndb>

лось обнаружить особенности, которые ранее в литературе не отмечались.

Пульсар PSR J1543+0929 имеет низкоуровневое излучение (межимпульсное излучение) практически на всех долготах внутри периода пульсара. По-видимому, это всего лишь второй (после PSR J0953+0755) пульсар, излучение которого занимает больше 90% периода. Вероятнее всего, это излучение связано с тем, что пульсар является соосным. Его угол между осью вращения и магнитной осью мал и поэтому наблюдатель может видеть область излучения в течение всего периода.

У PSR J2234+2114 обнаружен предимпульс, отстоящий от главного импульса на расстоянии 53° и имеющий относительную амплитуду 0.1. На частотах 346.7 МГц и 430 МГц профиль имеет более сложный вид, по-видимому, с тремя компонентами.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность антенной группе БСА за постоянную поддержку работы радиотелескопа в режиме мониторинга, и Л.Б. Потаповой за помощь при оформлении работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *D.J. Helfand, R.N. Manchester, and J.H. Taylor*, 198(1), 661 (1975).
2. *N. Rathnasree and J.M. Rankin*, 452, 814 (1995).
3. *J.H. Taylor, R.N. Manchester, and G.R. Huguenin*, 195(1), 513 (1975).
4. *J.D. Biggs, P.M. McCulloch, P.A. Hamilton, R.N. Manchester, and A.G. Lyne*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 215, 281 (1985).
5. *J.M. Durdin, M.I. Large, A.G. Little, R.N. Manchester, A.G. Lyne, and J.H. Taylor*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 186, 39P (1979).
6. *T.H. Hankins and J.M. Cordes*, ApJ, 249, 241 (1981).
7. *T.V. Smirnova and T.V. Shabanova*, Soviet Astron. 32(1), 61 (1988).
8. *T.B. Смирнова, М.О. Торопов, С.А. Тюльбашев*, Astron. Rep. 68(8), 828, (2024).
9. *T.E.E. Olszanski, D. Mitra, and J.M. Rankin*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 489(2), 1543 (2019).
10. *S.A. Tyul'bashev, M.A. Kitaeva, and G.E. Tyul'basheva*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 517(1), 1112 (2022).
11. *S.A. Tyul'bashev, P.Yu. Golysheva, V.S. Tyul'bashev, and I.A. Subaev*, Astron. Rep. 63(11), 920 (2019).
12. *M.O. Торопов и др.*, в печати (2024).
13. *A.V. Bilous, V.I. Kondratiev, M. Kramer, E.F. Keane, et al.*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 591, id. 134 (2016).
14. *J. M. Rankin*, 274, 359 (1983).
15. *J. M. Rankin*, 405, 285 (1993).
16. *H. Wahl, J. Rankin, A. Venkataraman, and T. Olszanski*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 520(1), 314 (2023).
17. *F. Camilo and D.J. Nice*, 445, 756 (1995).

SEARCH FOR WEAK COMPONENTS IN PULSAR RADIATION

T. V. Smirnova¹, M. O. Toropov², S. A. Tyul'bashev^{1,*}

¹*Lebedev Physical Institute, Astro space center, Pushchino radio astronomy observatory, Pushchino, Moscow reg., Russia*

²*LLC TEK Inform, Moscow, Russia*

E-mail: serg@prao.ru

The search for weak components outside the main pulse (MP) in the radiation of pulsars at a frequency of 110 MHz observed on the LPA LPI telescope in the Pushchino Multibeam Pulsar Search (PUMPS) has been carried out. The sample included 96 pulsars, for which the signal-to-noise ratio (S/N) in the main pulse of the average profile during accumulation over 10 years was more than 40. It was found that PSR J1543+0929 has radiation for almost the entire period. The profile is three-component. The relative amplitudes of the lateral weak components are 0.013 and 0.025. For PSR J2234+2114, a precursor was detected that is 53° away from the MP.

Keywords: pulsars, average profiles, extended radiation