

## ВАРИАЦИИ ПИКОВЫХ ПЛОТНОСТЕЙ ПОТОКА ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ИМПУЛЬСОВ 26 СЕКУНДНЫХ ПУЛЬСАРОВ НА ЧАСТОТЕ 111 МГц

© 2021 г. А. Н. Казанцев<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Пушчинская радиоастрономическая обсерватория АКЦ ФИАН, Пушино, Россия

\*E-mail: kaz.prao@bk.ru

Поступила в редакцию 05.05.2021 г.

После доработки 05.06.2021 г.

Принята к публикации 14.06.2021 г.

В статье приведены результаты обработки наблюдений 26 секундных пульсаров северного полушария, полученные в рамках поиска и исследования гигантских импульсов пульсаров на Большой синфазной антенне Пушчинской радиоастрономической обсерватории на 111 МГц. От пульсаров В0011+47, В0450+55, В0525+21, В0751+32, В0823+26 и В0917+63 были обнаружены индивидуальные импульсы, в 30 и более раз превосходящие динамический средний профиль по амплитуде. Обнаружены индивидуальные импульсы, удовлетворяющие основным критериям гигантских импульсов пульсаров от В0450+55, В0525+21 и В0751+32. Произведен анализ распределений индивидуальных импульсов пульсаров по пиковой плотности потока относительно средней плотности потока в сеансе. Из проанализированной выборки для 5 пульсаров распределение является логнормальным, для 10 – комбинацией логнормального и степенного распределений. В остальных случаях не может быть однозначно аппроксимировано только логнормальным распределением или комбинацией логнормального и степенного распределений.

*Ключевые слова:* пульсары, радиоизлучение, индивидуальные импульсы, гигантские импульсы

**DOI:** 10.31857/S0004629921100170

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Радиопульсары являются весьма противоречивыми астрофизическими объектами. С одной стороны, хорошо прогнозируемые вращательные параметры пульсаров позволяют рассматривать их как высокостабильные часы в космосе, что позволяет использовать их как в решении ряда астрофизических задач и задач небесной механики методами хронометрирования, так и рассматривать в качестве опорных источников для построения шкал времени и навигации в дальнем космосе [1]. Одновременно с этим излучение радиопульсаров достаточно существенно изменяется по частоте и во времени. Индивидуальные импульсы, излученные в соседних периодах, могут быть различны по форме, фазе и амплитуде. Кроме того, пульсары демонстрируют ряд эффектов, в которых различие индивидуальных импульсов по пиковым плотностям потока достигает огромных значений. Одним из таких явлений является “выключение” излучения пульсаров на достаточно длительные промежутки времени – нуллинг (англ. *nulling*), впервые обнаруженное в работе [2]. Вторым феноменом является генерация так называемых гигантских импульсов (ГИ) пульса-

ров, впервые обнаруженное у пульсара в Крабовидной туманности [3] и выражающееся в генерации очень мощных индивидуальных импульсов, существенно превосходящих регулярное излучение пульсара по пиковой плотности потока. Для пульсара В0531+21 ГИ могут превосходить регулярное излучение в  $10^5$ – $10^6$  раз [4].

Два этих феномена наглядно демонстрируют, насколько нестабильным может быть интенсивность излучения радиопульсаров во времени. Помимо этого, данные феномены могут являться объяснением для ряда других эффектов и явлений, существующих в современной астрофизике. Например, вращающиеся радиотранзиенты (Rotating Radio Transients, RRATs) [5], природа которых до сих пор окончательно не определена, могут являться как пульсарами с экстремально продолжительными нуллингами [6], так и быть далекими пульсарами, генерирующими ГИ. Из-за недостаточной чувствительности современных радиотелескопов регулярное излучение от таких пульсаров не фиксируется, а детектируются только особенно сильные ГИ. Это утверждение подтверждается наличием у радиотранзиентов степенного распределения [7], являющегося

Таблица 1. Параметры исследуемых пульсаров

Имя пульсара	RA, hh:mm:ss	DEC, dd:mm:ss	$P$ , с	$\dot{P}$ , $10^{-15}$ с/с	DM, пк см $^{-3}$	PEPOCH
B0011+47	00:14:17.75	47:46:33.40	1.240699	0.56	30.4	49664
B0031-07	00:34:08.87	-07:21:53.41	0.942951	0.41	10.9	46635
B0051+04	00:51:30.01	04:22:49.00	0.354732	0.01	13.9	49800
B0105+65	01:08:22.51	66:08:34.50	1.283660	13.10	30.5	50011
B0138+59	01:41:39.94	60:09:32.32	1.222949	0.39	34.9	49293
B0320+39	03:23:26.65	39:44:52.40	3.032072	0.64	26.2	49290
B0329+54	03:32:59.41	54:34:43.33	0.714520	2.05	26.8	46473
B0450+55	04:54:07.75	55:43:41.44	0.340729	2.37	14.6	49910
B0525+21	05:28:52.25	22:00:04.00	3.745539	40.00	50.9	54200
B0643+80	06:53:15.09	80:52:00.22	1.214441	3.80	33.3	48712
B0751+32	07:54:40.69	32:31:56.20	1.442349	1.08	40.0	48725
B0823+26	08:26:51.51	26:37:21.30	0.530661	1.71	19.5	46450
B0834+06	08:37:05.64	06:10:14.56	1.273768	6.80	12.9	48721
B0917+63	09:21:14.14	62:54:13.90	1.567994	3.61	13.2	49687
B0919+06	09:22:14.02	06:38:23.30	0.430627	13.70	27.3	55140
B1508+55	15:09:25.63	55:31:32.39	0.739682	5.00	19.6	49904
B1642-03	16:45:02.04	-03:17:57.81	0.387690	1.78	35.7	46515
B1737+13	17:40:07.35	13:11:56.69	0.803050	1.45	48.7	48262
B1839+56	18:40:44.54	56:40:54.85	1.652862	1.50	26.8	48717
B1919+21	19:21:44.82	21:53:02.25	1.337302	1.35	12.4	48999
B2016+28	20:18:03.83	28:39:54.21	0.557953	14.8	14.2	46384
B2020+28	20:22:37.07	28:54:23.11	0.343402	1.90	24.6	49692
B2110+27	21:13:04.35	27:54:01.16	1.202852	2.62	25.1	48741
B2224+65	22:25:52.86	65:35:36.37	0.682542	9.66	36.4	54420
B2303+30	23:05:58.32	31:00:01.28	1.575886	2.89	49.6	48714
B2315+21	23:17:57.84	21:49:48.02	1.444653	1.05	20.9	48716

одним из обязательных критериев принадлежности индивидуальных импульсов к подклассу ГИ [8]. Важно отметить, что у части RRATs отсутствует степенной хвост в распределении импульсов по пиковым плотностям потока, однако при этом само распределение имеет нетипичный для пульсаров двухкомпонентный вид [9]. Помимо радиотранзиентов, механизм генерации ГИ может являться объяснением так называемых быстрых радиовсплесков (Fast Radio Burst, FRB) [10]. Таким образом, исследование нуллинов и гигантских импульсов важно не только для понимания самих явлений, но также может дать дополнительную информацию, необходимую для описания явления RRATs и FRB.

Начиная с 2012 г. мы реализуем программу по поиску и исследованию гигантских импульсов пульсаров на базе Пушинской радиоастрономической обсерватории Астрокосмического центра Физического института Академии наук (здесь и

далее ПРАО АКЦ ФИАН). Основным результатом данной программы стало обнаружение гигантских импульсов у пульсаров B0301+19 [11] и B1237+25 [12], а также анализ выборки большого количества импульсов от уже известных пульсаров с ГИ [13]. Одновременно с упомянутыми пульсарами в программу поиска включались различные секундные пульсары северного полушария (см. табл. 1). Критериями включения в программу были: склонение  $>-10^\circ$ , малое значение меры дисперсии ( $DM < 60$  пк см $^{-3}$ ) и достаточный поток радиоизлучения от пульсара для уверенного фиксирования среднего профиля пульсара в единичной записи.

В настоящей статье представлены результаты анализа вариаций пиковых плотностей потока индивидуальных импульсов 26 секундных радиопулсаров северного полушария с целью поиска у них мощных индивидуальных импульсов, сильно выделяющихся на фоне регулярного излучения.

Отметим, что рассматриваемая в данной работе статистика распределения пиковой плотности потока индивидуальных импульсов в сеансе (относительно среднего значения импульса в сеансе) строго говоря, должна отличаться от статистики распределения индивидуальных импульсов в абсолютных величинах (Янских) (см., напр., [13]). В данной работе рассматривается только статистика распределения индивидуальных импульсов в сеансе, характеризующая относительный вклад двух различных механизмов генерации импульсов пульсаров, обычных (регулярных) и аномальных (в том числе гигантских).

Статья включает в себя 4 раздела. В разделе 2 описаны используемые в работе данные и использованные методы обработки. В разделе 3 переведены и обсуждены полученные результаты. Выводы по работе приведены в разделе 4.

## 2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

В настоящей работе были использованы данные, полученные на Большой синфазной антенне ПРАО АКЦ ФИАН (БСА ФИАН) в период с 2012 по 2020 г. Антенна представляет собой транзитный радиотелескоп в виде фазированной антенной решетки со сторонами  $200 \times 400$  м. Приемными элементами антенны являются 16384 полуволновых диполя Герца. Диаграмма направленности телескопа ориентирована на главный меридиан и имеет возможность изменять свое положение по склонению с шагом  $1/2$  ширины луча в диапазоне склонений от  $-16^\circ$  до  $+87^\circ$ . Наблюдения объектов проводятся в момент их верхней кульминации и в течение их прохождения через луч диаграммы направленности радиотелескопа по уровню  $1/2$ . Ширина луча диаграммы направленности по указанному уровню составляет:  $50'$  по прямому восхождению,  $22'$  по склонению при направлении на зенит и  $44'$  при склонении луча  $30^\circ$ . Длительность одного сеанса наблюдения зависит от склонения наблюдаемого объекта и находится в пределах от 3 до 12 мин. Антенна принимает одну линейную поляризацию в направлении “восток–запад”.

Запись данных осуществляется посредством сбора сигнала с диполей антенны и последующей оцифровки 512-канальным цифровым пульсарным приемником с центральной частотой приема 111 МГц и полосой пропускания  $\Delta f = 5$  кГц на один частотный канал. Анализу подвергались 460 центральных каналов, в силу чего итоговая полоса пропускания составила 2.3 МГц. В подавляющем большинстве сеансов наблюдения временное разрешение составляло 1.2288 мс. Для части данных временное разрешение было равно 2.4576 мс. Цифровой пульсарный приемник производил запись пульсаров в режиме регистрации

индивидуальных импульсов. Специальный синхронизатор генерировал триггерные импульсы, которые синхронизировали работу цифрового пульсарного приемника с периодом наблюдаемого пульсара. Эфемериды исследуемых пульсаров были взяты из каталога ATNF<sup>1</sup> с использованием пакета psrqup [14]. Точная привязка по времени обеспечивалась сигналами от системы глобального позиционирования (Global Positioning System, GPS). Точность перевода времени GPS во всемирное время (Universal Time, UT) составляла  $\pm 100$  нс. Точность установки времени старта записи каждого отдельного индивидуального импульса наблюдаемого пульсара составляла  $\pm 10$  нс. Указанные точности являются достаточными для работы с секундными пульсарами.

Производилась постдетекторная компенсация индивидуальных импульсов за меру дисперсии. Полученная запись скомпенсированных индивидуальных импульсов усреднялась синхронно с периодом конкретного пульсара для получения динамического среднего профиля. Для дальнейшей статистики использовались импульсы с амплитудой свыше  $4\sigma_{\text{noise}}$  ( $\sigma_{\text{noise}}$  – среднеквадратичное отклонение шума вне долготы импульса пульсара) и попадающие на долготы среднего профиля пульсара. Долготы среднего профиля пульсара и положение шумовой дорожки определялись посредством нахождения положения максимума кросс-корреляционной функции динамического среднего профиля и шаблона среднего профиля, полученного путем усреднения большого количества средних профилей пульсара. Используемые в работе шаблоны приведены на рис. 1. Для каждого пульсара строилось распределение индивидуальных импульсов по потоку в единицах динамического среднего профиля ( $S_{\text{AP}}$ ) и производилась аппроксимация полученного распределения логнормальной функцией (1):

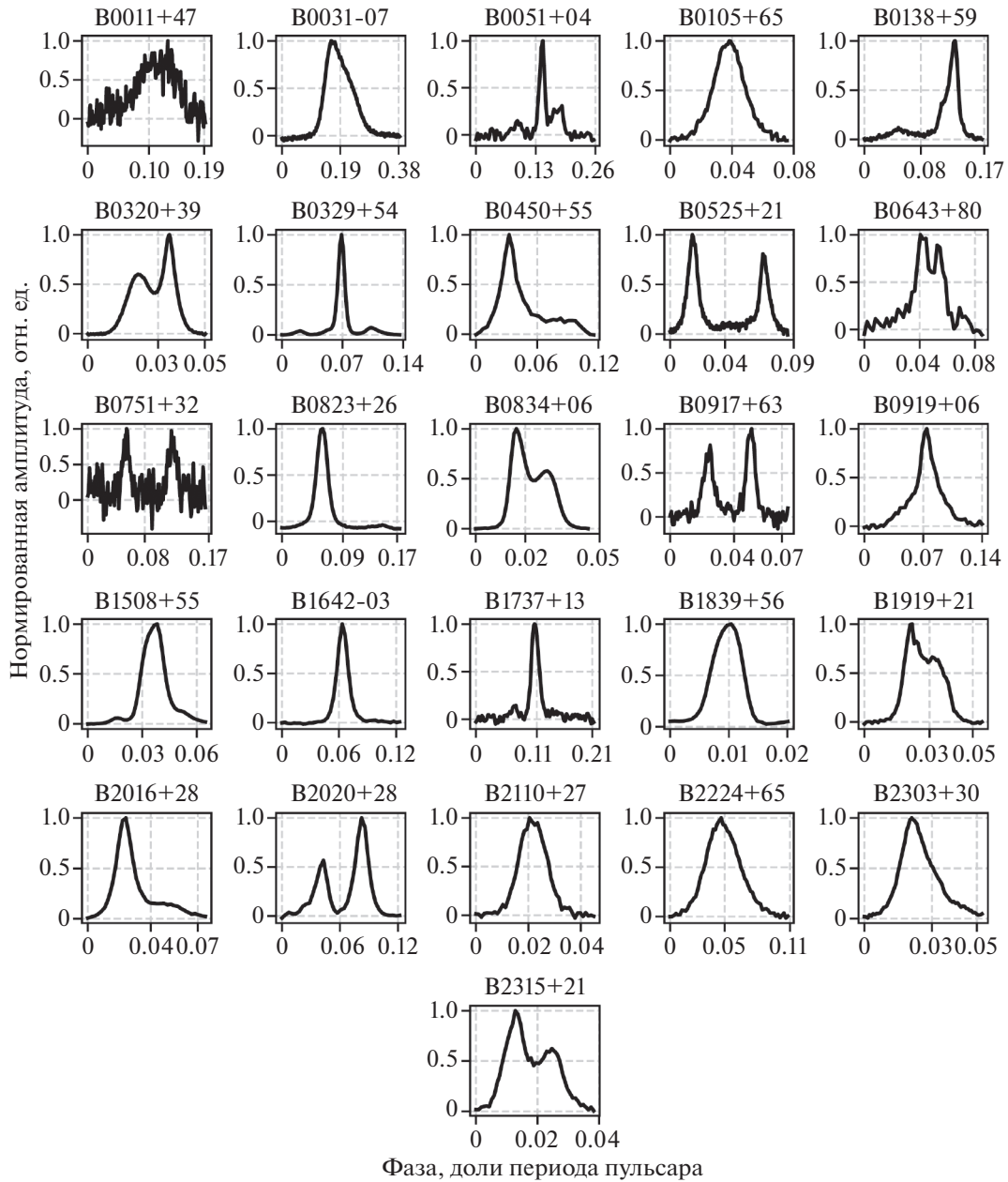
$$f_{LN}(x) = \frac{q}{x} e^{-(\ln x - \mu)^2 / 2\sigma^2}, \quad (1)$$

где  $q = 1/\sigma\sqrt{2\pi}$ ,  $\sigma$  – среднеквадратичное отклонение,  $\mu$  – математическое ожидание. В тех случаях, когда аппроксимация логнормальной функцией считалась неудовлетворительной, массив данных аппроксимировался комбинацией логнормальной функцией для левой части распределения и степенной функцией (2) для правой (высокоэнергичной) части распределения:

$$f_{PL}(x) = Ax^k, \quad (2)$$

где  $A$  – коэффициент пропорциональности,  $k$  – показатель степени.

<sup>1</sup> <http://www.atnf.csiro.au/people/pulsar/psrcat/>



**Рис. 1.** Шаблоны средних профилей пульсаров, используемые в настоящей работе для определения границ среднего профиля в записи.

Аппроксимация производилась нелинейным методом наименьших квадратов, с использованием библиотеки LMFIT<sup>2</sup>. В качестве критерия достоверности производимой аппроксимации на примере работы [9] было использовано приведенное  $\chi^2$  (reduced chi-squared) распределение<sup>3</sup>, рассчитываемое по формуле:

$$\chi_r^2 = \frac{\chi^2}{N - N_{\text{vars}}}, \quad (3)$$

где  $N$  – размер аппроксимируемой выборки,  $N_{\text{vars}}$  – количество переменных в аппроксимируемой функции,  $N - N_{\text{vars}}$  – число степеней свободы.

В тех случаях, когда пиковая плотность потока зарегистрированного индивидуального импульса превышала пиковую плотность потока динамического среднего профиля в 30 и более раз, этот импульс проверялся на наличие у него дисперсионного запаздывания, соответствующего мере дисперсии пульсара. Мера дисперсии соответствующего импульса определялась по формуле

<sup>2</sup> <https://lmfit.github.io/lmfit-py/intro.html>

<sup>3</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Reduced\\_chi-squared\\_statistic](https://en.wikipedia.org/wiki/Reduced_chi-squared_statistic)

(4), выведенной из формул, представленных в [15]:

$$DM = \frac{m_e c \Delta t}{2\pi e^2 (1/w_2^2 - 1/w_1^2)}, \quad (4)$$

где  $m_e$  – масса электрона ( $9.11 \times 10^{-28}$  г),  $e$  – заряд электрона ( $4.8 \times 10^{-10}$  ед. заряда СГС),  $c$  – скорость света в вакууме ( $3 \times 10^{10}$  см/с),  $\Delta t$  – временное запаздывание между выбранными частотны-

ми каналами,  $w_1, w_2$  – круговые частоты ( $w = 2\pi\nu$ ) выбранных частотных каналов. Важно заметить, что получаемое по формуле (4) значение приводится в системе СГС. Чтобы получить принятую в пульсарной астрофизике размерность, необходимо полученное значение поделить на количество сантиметров в парсеке ( $1 \text{ пк} = 3 \times 10^{18} \text{ см}$ ).

Погрешность определения меры дисперсии  $\Delta DM$  вычислялась по формуле:

$$\Delta DM = \sqrt{\left(\frac{\partial DM}{\partial t_1} \Delta t_1\right)^2 + \left(\frac{\partial DM}{\partial t_2} \Delta t_2\right)^2 + \left(\frac{\partial DM}{\partial w_1} \Delta w\right)^2 + \left(\frac{\partial DM}{\partial w_2} \Delta w\right)^2}, \quad (5)$$

где  $\frac{\partial DM}{\partial t_1}, \frac{\partial DM}{\partial t_2}, \frac{\partial DM}{\partial w_1}, \frac{\partial DM}{\partial w_2}$  – частные производные формулы (4),  $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$  – ширина импульса на уровне 0.5 в соответствующем частотном канале,  $\Delta w$  – ширина частотного канала, в нашем случае равная 5 кГц.

Для оценки вклада времени рассеяния в регистрируемую ширину импульса производилась оценка  $\tau_{sc}$  формуле, полученной в работе [16] для галактических пульсаров:

$$\tau_{sc} = 3.5 \times 10^5 \left(\frac{DM}{\text{пк см}^{-3}}\right)^{2.2} \left(\frac{\nu}{\text{МГц}}\right)^{-4.4} \text{ мс}, \quad (6)$$

где  $DM$  – мера дисперсии пульсара,  $\nu$  – частота наблюдения, в нашем случае равная 111 МГц.

Форма рассеянного импульса, в свою очередь, определялась сверткой [17]:

$$f(t) = \int f_0(t) s(t - \xi) \xi, \quad (7)$$

где  $f_0(t) = a \exp(-(t - b)^2 / 2\sigma^2)$  – индивидуальный импульс, не подвергшийся рассеянию на межзвездной среде, предполагается гауссовой формы,  $s(t)$  – модель тонкого рассеивающего экрана [17]:

$$s(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0, \\ e^{t/\tau_{sc}} & \text{при } t \geq 0, \end{cases} \quad (8)$$

где  $\tau_{sc}$  – время рассеяния, оцениваемое нами по формуле (6).

Для пульсаров, у которых были зафиксированы индивидуальные импульсы с пиковой плотностью потока в 30 и более раз выше пиковой плотности потока в динамическом среднем профиле, проводился анализ времен прихода индивидуальных импульсов по долготе среднего профиля.

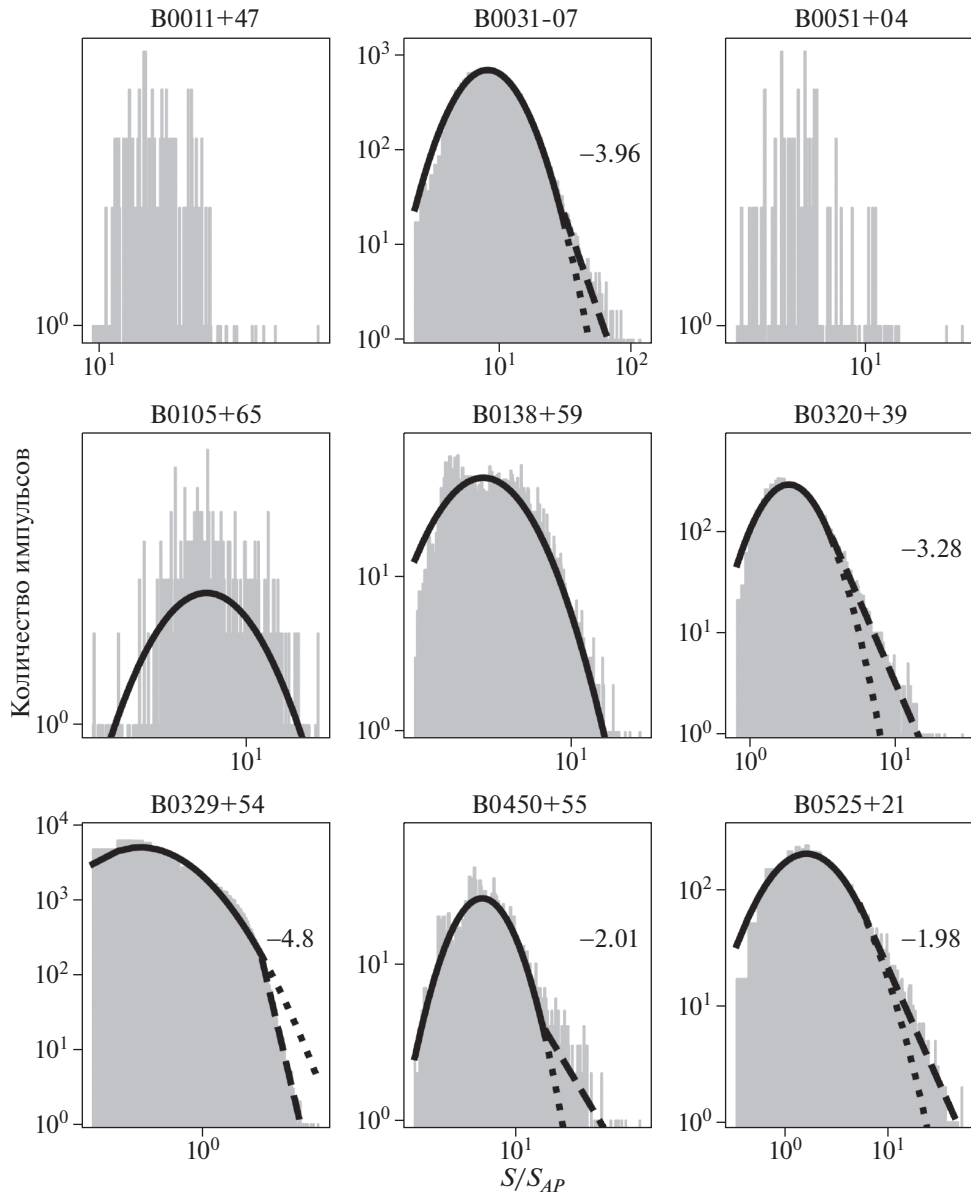
### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Распределения индивидуальных импульсов исследуемых пульсаров по пиковой плотности потока относительно средней плотности потока в сеансе представлены на рис. 2–4. Подробная статистика по количеству проанализированных периодов, импульсов и обнаруженных кандидатов в ГИ приведена в табл. 2. В табл. 3 приведены результаты аппроксимации соответствующих распределений по каждому из исследуемых пульсаров.

Из-за малого количества индивидуальных импульсов для пульсаров В0011+47, В0051+08, В0643+80 и В1731+13 аппроксимация распределений не проводилась, а приведенные распределения представлены для иллюстрации зафиксированных превышений индивидуальных импульсов над динамическим средним профилем пульсара.

Распределение индивидуальных импульсов пульсара В0329+54 по пиковой плотности потока в единицах динамического среднего профиля демонстрирует нетипичный для исследуемых пульсаров вид. Для импульсов свыше 5.1 среднего профиля наблюдается резкий излом с показателем степени  $-4.8$  ( $\chi_r^2 = 1.3$ ). Следует отметить, что исследование распределений индивидуальных импульсов данного пульсара по пиковой плотности потока ранее производилось нами в работе [13], но для меньшей выборки, включающей 63 сеанса наблюдений. В абсолютных единицах распределение данного пульсара повторяет вид, полученный в настоящей работе.

Анализ наблюдений пульсаров В0138+59, В0823+26, В0919+06 и В2016+28 показал наличие у них двугорбого распределения индивидуальных импульсов по потоку относительно средней плотности потока в сеансе. Полученные распределения не могут быть однозначно аппроксимированы только логнормальной функцией или комбинацией логнормальной и степенной функций. На соответствующих пульсарам иллюстрациях при-



**Рис. 2.** Гистограммы распределения индивидуальных импульсов первых 9 пульсаров из табл. 1 по пиковой плотности потока в единицах динамического среднего профиля и результат аппроксимации соответствующего распределения логнормальной (сплошные и пунктирные линии) и степенной (штриховые линии) функциями.

ведена наилучшая аппроксимация (аппроксимация с минимальным  $\chi_r^2$ ) логнормальной функцией для демонстрации отличия полученного распределения от логнормального. Подобный вид распределения ранее был обнаружен для пульсара J1820–1346 и вращающихся радиотранзиентов J1826–1419 и J1846–0257 в работе [9]. Авторы связывают такой вид распределения с наличием у исследуемых объектов всплывающей активности.

Несмотря на отсутствие сильных превышений индивидуальных импульсов над средним профилем ( $S/S_{AP} > 30$ ) у пульсаров B0320+39,

B1508+55, B1642–03, B2020+28, B2110+27 распределения индивидуальных импульсов пульсаров по пиковой плотности потока в единицах динамического среднего профиля демонстрируют наличие степенного хвоста. Так, для пульсара B0320+39 распределение не может быть описано только логнормальной функцией ( $\chi_r^2 = 13 \times 10^3$ ). Для импульсов, в 3.6 раза превосходящих динамический средний профиль по амплитуде, распределение лучше описывается степенной функцией с показателем степени  $k = -3.28$  ( $\chi_r^2 = 0.8$ ). В исследовании, проведенном на многолучевой

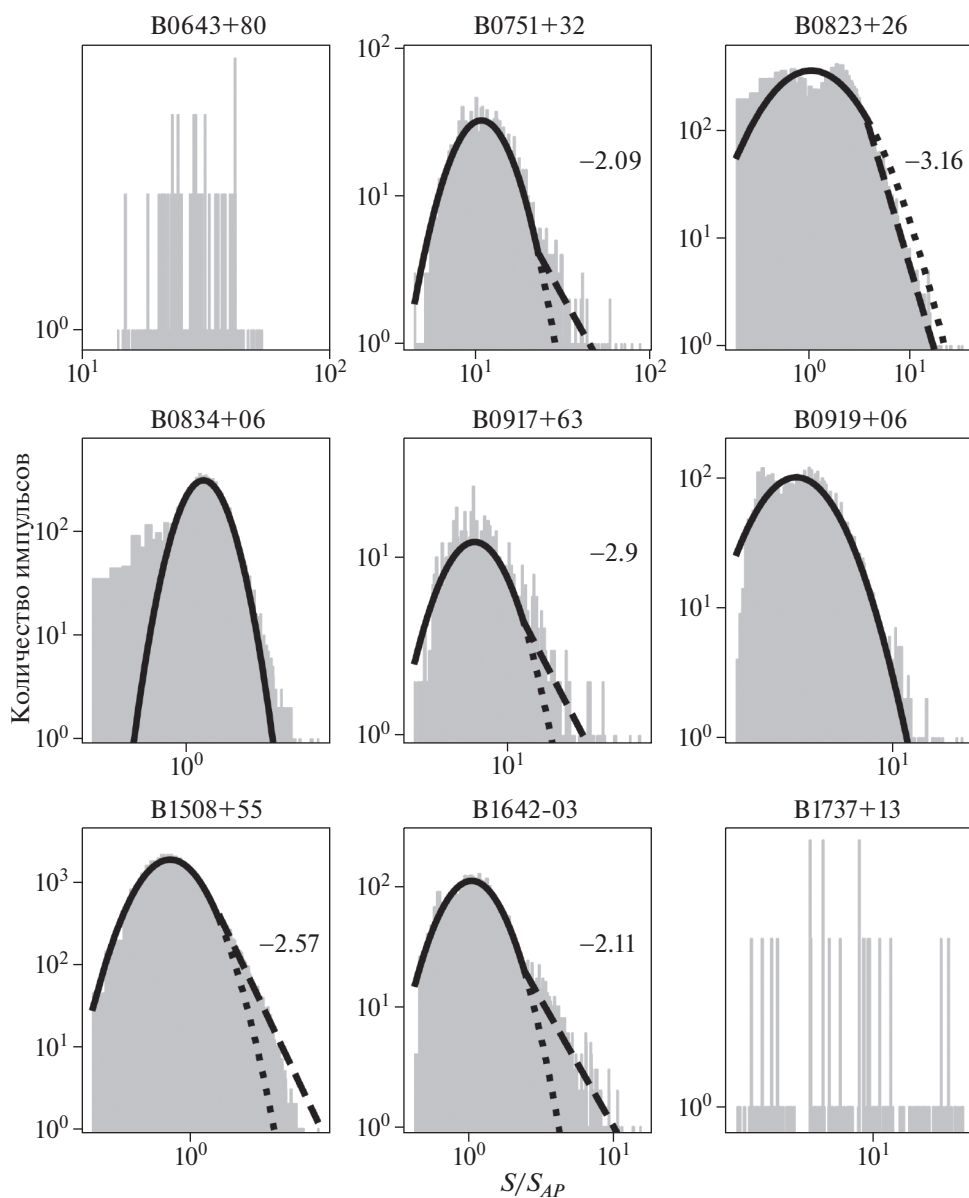


Рис. 3. То же, что на рис. 2, для следующих 9 пульсаров из табл. 1.

диаграмме направленности БСА ФИАН и включающем более богатую выборку индивидуальных импульсов (39 377), данный пульсар также демонстрирует степенное распределение для сильных импульсов [18]. Подобное поведение исследуемой группы пульсаров, а также результаты анализа пульсаров с ГИ на статистически значимом массиве данных [13] указывают на то, что степенной характер распределения ГИ по пиковой плотности потока, считающийся одним из основных критериев для их классификации, не является строгим для подкласса пульсаров с низкой величиной магнитного поля на световом цилиндре

(для всех пульсаров исследованной группы значения магнитного поля на световом цилиндре  $B_{LC}$  лежат в пределах от 10 до 300 Гс).

Далее представлены результаты анализа наблюдательных данных тех пульсаров, у которых были обнаружены индивидуальные импульсы, в 30 и более раз превысившие динамический средний профиль по пиковой плотности потока.

### 3.1. B0011+47

От пульсара B0011+47 было зарегистрировано 2 индивидуальных импульса, удовлетворивших критерию поиска ( $S/S_{AP} > 30$ ). Самое сильное зарегистрированное превышение составило 41 раз.

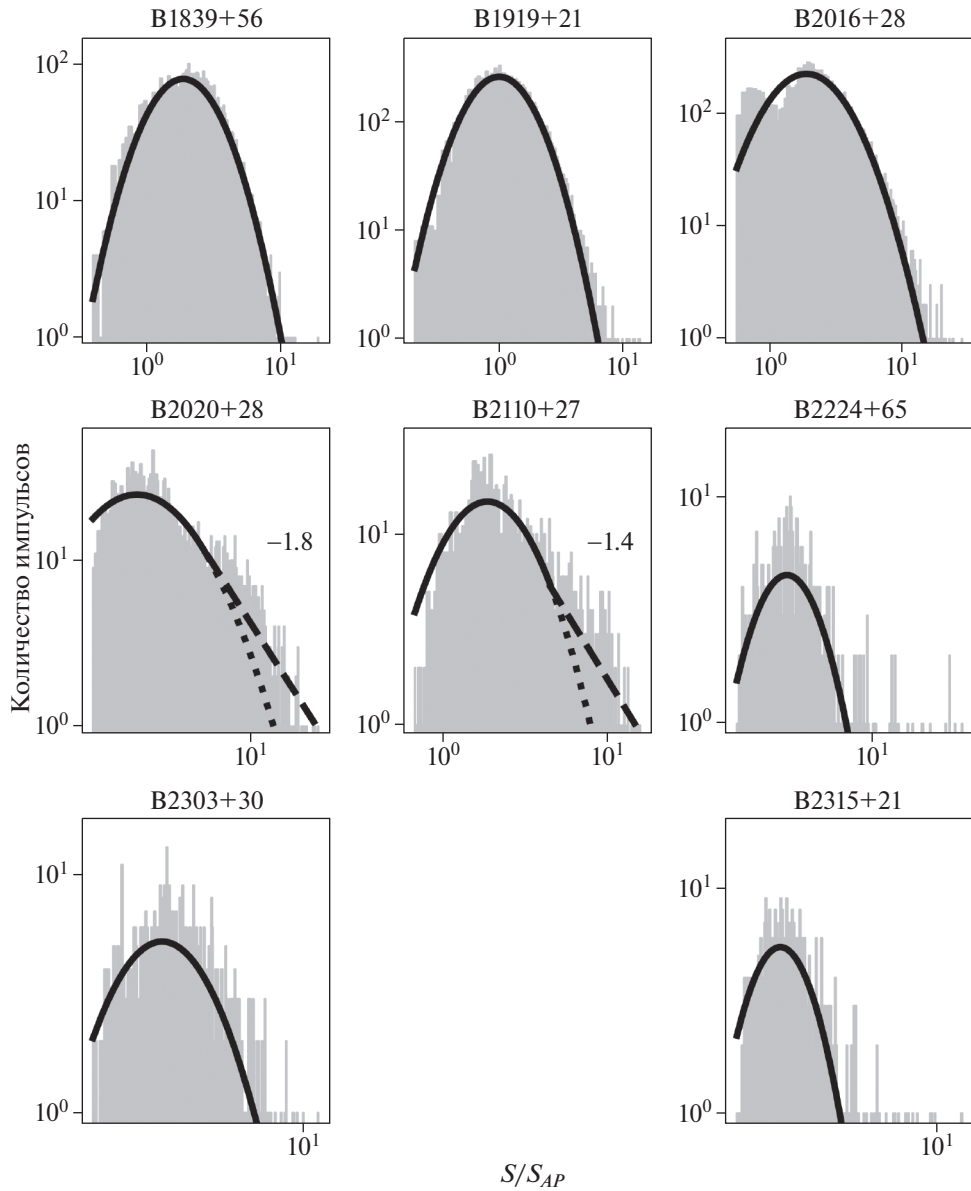


Рис. 4. То же, что на рис. 2, для последних 8 пульсаров из табл. 1.

Изображение данного импульса вместе с увеличенным средним профилем представлено на рис. 5. Дисперсионное запаздывание индивидуального импульса в полосе 2.3 МГц (111.8–109.5 МГц) составляет  $430 \pm 16$  мс. Данное запаздывание соответствует мере дисперсии  $30.57 \pm 10.56$  пк см<sup>-3</sup>. Мера дисперсии пульсара B0011+47 составляет  $30.4$  пк см<sup>-3</sup> (см. табл. 1). Большое значение погрешности определения меры дисперсии связано с тем, что существенный вклад в его итоговую величину вносит полуширина регистрируемого импульса, в случае пульсара B0011+47 составляющая  $16.0 \pm 1.2$  мс. Время рассеяния для данного пульсара, согласно формуле (6), составляет 0.6 мс, и не вносит суще-

ственного вклада в измеряемую ширину импульса. Как видно из рис. 5, зарегистрированный импульс в два раза уже динамического среднего профиля. Фаза зарегистрированных импульсов лежит в пределах долгот среднего профиля пульсара (см. рис. 6). Помимо анализа времен прихода индивидуальных импульсов по долготе среднего профиля для пульсара B0011+47 и для пульсаров, результаты которых представлены далее, было произведено сравнение двух усредненных профилей. Один профиль получен путем усреднения всех зарегистрированных импульсов пульсара с амплитудой свыше  $4\sigma_{\text{noise}}$ , но не удовлетворяющих критерию поиска. Второй профиль сформирован исключительно из индивидуальных им-



Таблица 2. Статистика по проведенным наблюдениям

Имя пульсара	$N_{\text{sessions}}$	$T_{\text{observation}}$	$N_{\text{periods}}$	$N_{\text{pulses}}$	$N_{\text{strong}}$	$\max(S/S_{\text{AP}})$
B0011+47	52	4.12	11960	258	2	41
B0031-07	754	40.49	154570	33291	978	118
B0051+04	18	0.96	9756	192	0	21
B0105+65	111	14.68	41181	604	0	14
B0138+59	98	10.52	30968	5406	0	21
B0320+39	189	13.05	15498	11660	0	29
B0329+54	339	31.22	157296	137414	0	24
B0450+55	172	16.30	172172	2165	7	46
B0525+21	492	28.15	27060	9556	57	52
B0643+80	87	21.44	86478	240	117	53
B0751+32	286	17.99	44902	2155	81	89
B0823+26	109	6.49	44036	17139	2	33
B0834+06	147	7.85	22197	13660	0	27
B0917+63	74	8.64	19832	1320	2	31
B0919+06	509	27.28	228032	7563	0	25
B1508+55	165	15.53	75570	62728	0	19
B1642-03	53	2.83	26288	5391	0	15
B1737+13	36	1.97	8820	141	0	17
B1839+56	92	8.91	19412	6364	0	19
B1919+21	131	7.49	20174	15629	0	14
B2016+28	98	5.95	38416	14121	0	29
B2020+28	102	6.21	65076	2914	0	23
B2110+27	66	3.97	11880	1788	0	16
B2224+65	12	1.55	8196	491	0	18
B2303+30	11	0.68	1562	749	0	12
B2315+21	18	1.03	2574	477	0	12

Примечание. Приведены:  $N_{\text{sessions}}$  — количество проведенных сеансов наблюдений;  $T_{\text{observation}}$  — полное время наблюдений в часах;  $N_{\text{periods}}$  — количество проанализированных периодов пульсара;  $N_{\text{pulses}}$  — количество задетектированных импульсов ( $S/N \geq 4$ );  $N_{\text{strong}}$  — количество импульсов, в 30 и более раз превосходящих динамический средний профиль по амплитуде;  $\max(S/S_{\text{AP}})$  — самое сильное из зарегистрированных превышений.

пульсов, чья амплитуда в 30 и более раз больше амплитуды динамического среднего профиля. Данные профили представлены на правых панелях рис. 6. В случае пульсара B0011+47 количества зарегистрированных событий недостаточно, чтобы производить сравнение двух этих профилей.

### 3.2. B0031-07

В 2004 г. у пульсара B0031-07 было обнаружено явление генерации гигантских импульсов [19]. С целью увеличения количества наблюдательных данных и построения долговременной статистики пульсар был включен в наблюдательную программу по мониторингу ГИ пульсаров, проводимую в ПРАО АКЦ ФИАН с 2012 г. Всего для данного пульсара было проведено 754 сеанса

наблюдений в периоды 2012–2014 и 2017–2020 гг. В ходе анализа было зафиксировано 978 событий, в которых пиковая плотность потока индивидуального импульса превзошла пиковую плотность потока динамического среднего профиля в 30 и более раз. Наибольшее зафиксированное превышение составило 118 раз (см. рис. 5). Дисперсионное запаздывание данного индивидуального импульса в полосе 2.3 МГц составило  $142.5 \pm 4.5$  мс. Данное запаздывание соответствует мере дисперсии  $10.1 \pm 3.63$  пк см<sup>-3</sup> при мере дисперсии пульсара B0031-07, равной 10.9 пк см<sup>-3</sup> (см. табл. 1). Ширина зарегистрированного импульса в 6.2 раза уже динамического среднего профиля и составляет  $15.4 \pm 1.2$  мс на уровне 10% от максимума. Время рассеяния для данного пульсара на частоте

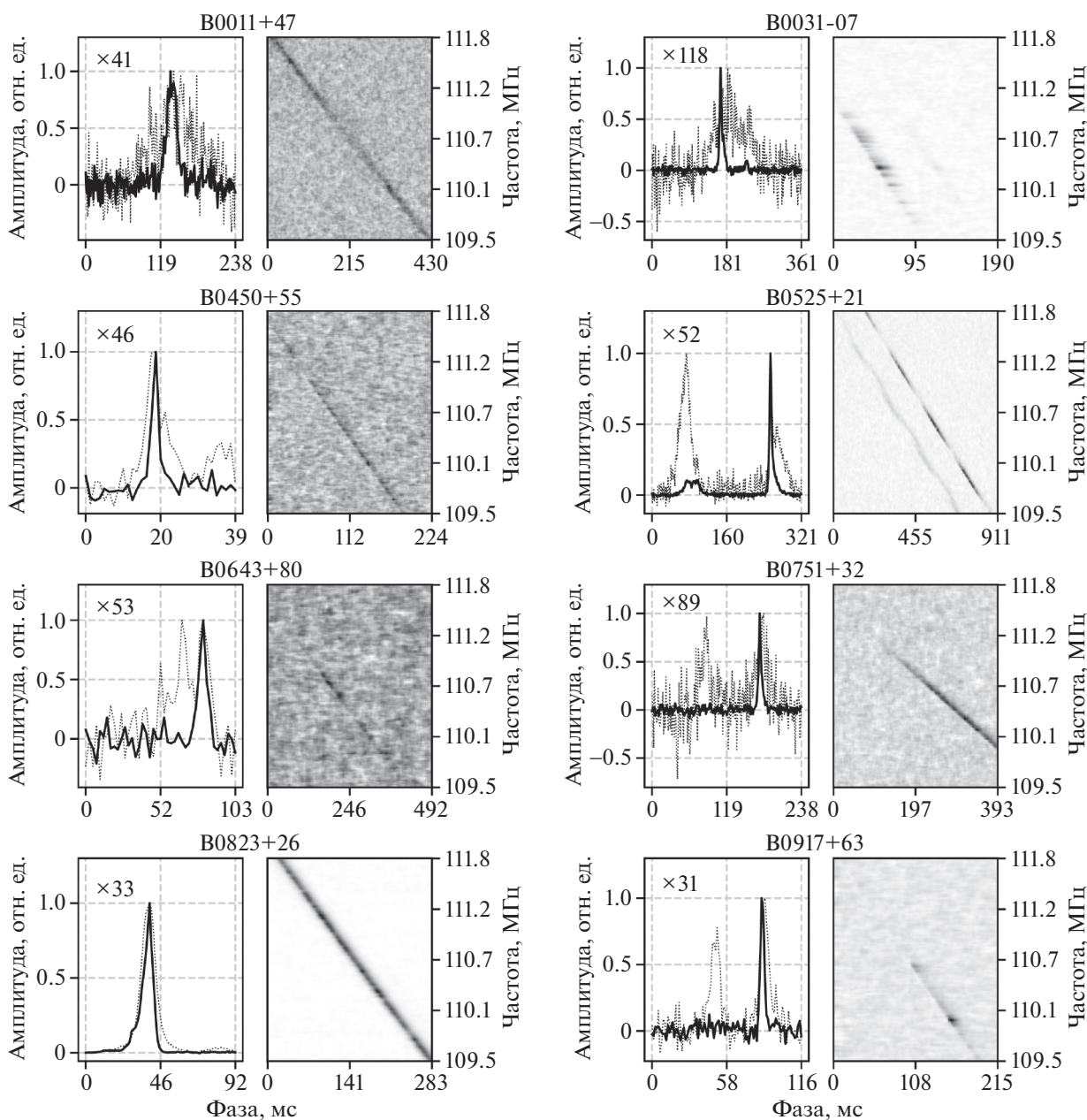
**Таблица 3.** Параметры аппроксимации распределений индивидуальных импульсов пульсаров

Имя пульсара	Логнормальная функция						Степенная функция			
	$q$	$\mu$	$\sigma$	$\chi_{full}^2$	$\chi_{low}^2$	$\chi_{high}^2$	$A$	$k$	$\chi_{power}^2$	$S_{PL}$
B0031–07	6260.75	2.34	0.49	59.9	3.2	99.8	$16.9 \times 10^6$	-3.96	0.8	30.6
B0105+65	23.77	2.21	0.29	0.6	—	—	—	—	—	—
B0138+59	185.03	1.57	0.48	1.7	—	—	—	—	—	—
B0320+39	575.82	0.79	0.43	$13 \times 10^3$	5.2	$>16 \times 10^3$	5972.99	-3.28	0.8	3.6
B0329+54	2114.83	-0.03	1.29	36.7	54.6	26.7	$42.5 \times 10^4$	-4.8	1.3	5.1
B0450+55	187.53	2.04	0.38	81.2	1.1	179.1	799.44	-2.01	0.5	14.2
B0525+21	456.43	1.15	0.82	5.7	3.0	6.2	2002.81	-1.98	0.9	5.2
B0751+32	376.85	2.52	0.37	1922.9	1.1	4019.3	2909.13	-2.09	0.5	22.7
B0823+26	557.23	0.83	0.89	10.7	23.1	7.1	7819.19	-3.16	1.1	3.7
B0834+06	559.73	0.71	0.51	7818.7	—	—	—	—	—	—
B0917+63	96.82	2.11	0.29	112.7	1.1	245.1	5236.19	-2.9	0.6	11.4
B0919+06	309.74	1.24	0.49	4.9	—	—	—	—	—	—
B1508+55	1423.61	-0.08	0.61	66.8	24.5	75.9	2166.7	-2.57	3.5	1.9
B1642–03	128.33	0.25	0.45	2921.9	1.7	3997.0	128.28	-2.11	0.7	2.4
B1839+56	174.23	0.96	0.57	1.7	—	—	—	—	—	—
B1919+21	310.71	0.31	0.55	7.7	—	—	—	—	—	—
B2016+28	512.53	1.02	0.62	4.6	—	—	—	—	—	—
B2020+28	78.9	1.36	0.65	2.2	1.9	2.4	268.82	-1.8	0.8	5.9
B2110+27	33.85	1.01	0.62	3.3	1.3	4.7	43.77	-1.4	0.7	4.4
B2224+65	26.72	1.8	0.22	1386.8	—	—	—	—	—	—
B2303+30	14.4	1.14	0.51	1.1	—	—	—	—	—	—
B2315+21	16.77	1.15	0.25	$>18 \times 10^3$	—	—	—	—	—	—

Примечание. Приведены:  $\chi_{full}^2 - \chi_r^2$ , рассчитанная для всей выборки;  $\chi_{low}^2 - \chi_r^2$ , рассчитанная для правой части бимодального распределения;  $\chi_{high}^2 - \chi_r^2$ , рассчитанная для левой части бимодального распределения;  $\chi_{power}^2 - \chi_r^2$ , рассчитанная для левой части бимодального распределения;  $S_{PL}$  — значение пиковой плотности потока в единицах  $S_{AP}$ , разделяющее распределение на две части.

111 МГц составляет 0.1 мс и не сказывается на итоговой форме импульса. Распределение индивидуальных импульсов пульсара B0031–07 по пиковой плотности потока в единицах динамического среднего профиля имеет характерный для пульсаров с ГИ бимодальный вид. Для импульсов, в 30.6 раза превосходящих динамический средний профиль по амплитуде распределения, описывается степенной функцией с показателем степени  $k = -3.96$  ( $\chi_r^2 = 0.8$ ). Заметим, что полученный нами показатель степени отличается от полученного в работе [19]. В указанной статье авторы, на основании 16 сеансов наблюдений, дают оценку показателя степени  $k = -4.5$ . Распределение индивидуальных импульсов пульсара B0031–07 по фазе демонстрирует более плотную локализацию ГИ в области центра среднего профиля. Ширина среднего профиля для мощных импульсов по уровню 0.5 в 1.6 раза меньше ширины сред-

него профиля для обычных импульсов. Подобное свидетельствует о более узкой локализации мощных импульсов в области генерации излучения. В распределении времен прихода индивидуальных импульсов пульсара B0031–07 (левая панель рис. 6) в области MJD 57 880 заметен сдвиг фазы для сильных импульсов. Поскольку фаза каждого индивидуального импульса в данных цифрового пульсарного приемника БСА ФИАН строго определена и приведена к началу каждой отдельной записи, данный сдвиг обусловлен эффектами, связанными с пульсаром, и не является артефактом обработки данных. Отсутствие наблюдений в период с MJD 56 790 по MJD 57 880 не позволяет сделать выводы о динамике данного сдвига. Хронометрирование мощных индивидуальных импульсов пульсара B0031–07 может дать больше информации о данном событии.

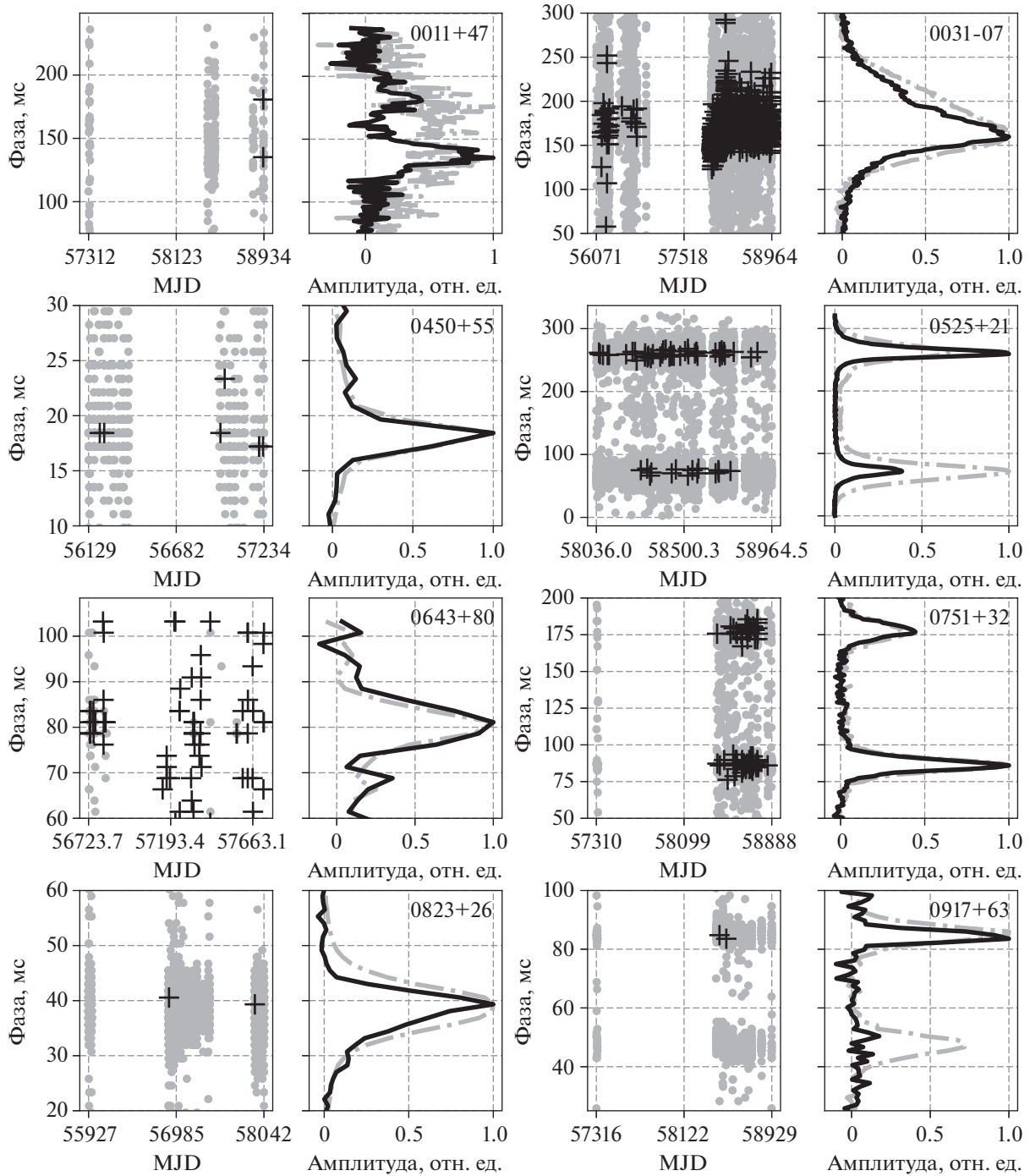


**Рис. 5.** Примеры наиболее сильных индивидуальных импульсов в 30 и более раз превысивших динамический средний профиль пульсара по амплитуде. На левых панелях каждого из фрагментов представлены скомпенсированные за дисперсию индивидуальные импульсы (сплошные линии) и увеличенные средние профили (пунктирные линии) по каждому пульсару. На правых панелях представлены соответствующие дисперсионные спектры зарегистрированных импульсов.

### 3.3. B0450+55

В проанализированном массиве данных пульсара B0450+55 было обнаружено 7 индивидуальных импульсов, удовлетворяющих критериям поиска. Самое сильное зарегистрированное превышение составило 46 раз (см. рис. 5). Дисперсионное запаздывание данного индивидуального импульса в полосе от 111.8 до 109.5 МГц составляет  $201.5 \pm 2.0$  мс. Это значение соответствует мере

дисперсии  $14.3 \pm 1.32$  пк см<sup>-3</sup>. Мера дисперсии пульсара B0450+55 составляет  $14.6$  пк см<sup>-3</sup> (см. табл. 1). Ширина данного импульса по уровню 0.1 в 3.5 раза меньше ширины динамического среднего профиля по соответствующему уровню и составляет  $3.9 \pm 1.2$  мс. Время рассеяния для данного пульсара мало (0.1 мс). Импульсы распределены в пределах долгот среднего профиля, а усредненный мощный импульс в точности повторяет сред-



**Рис. 6.** Распределение двух групп индивидуальных импульсов исследуемых пульсаров: нормальных и импульсов с пиковой плотностью потока более чем в 30 раз выше пиковой плотности потока динамического среднего профиля. На левой панели каждого из фрагментов представлено распределение импульсов по фазе (серые точки – нормальные импульсы, черные плюсы – мощные импульсы). На правой панели представлен соответствующий средний профиль, сформированный из всех нормальных импульсов (серые штрихпунктирные линии) и суммарный мощный импульс (черные линии).

ний профиль, сформированный нормальными импульсами (см. рис. 6). Распределение индивидуальных импульсов пульсара В0450+55 по пиковой плотности потока в единицах динамического

среднего профиля демонстрирует наличие степенного хвоста с показателем степени  $k = -2.01$  начиная с импульсов, в 14.2 раза превышающих средний профиль ( $\chi_r^2 = 0.5$ ).

### 3.4. B0525+21

В ходе анализа наблюдательных данных пульсара B0525+21 было обнаружено 57 индивидуальных импульсов с пиковой плотностью потока, в 30 и более раз превосходящей пиковую плотность потока динамического среднего профиля. Самое сильное зарегистрированное превышение составило 52 раза (см. рис. 5). Импульс с самым сильным превышением был зафиксирован во втором компоненте двухкомпонентного среднего профиля пульсара B0525+21. Дисперсионное запаздывание данного индивидуального импульса в полосе приема используемого пульсарного приемника составило  $694.3 \pm 5.4$  мс. Данное запаздывание соответствует мере дисперсии  $49.35 \pm 3.56$  пк см<sup>-3</sup>. Мера дисперсии пульсара B0525+21 равна 50.9 пк см<sup>-3</sup> (см. табл. 1). Зарегистрированный импульс в 2.7 раза уже компонента среднего профиля, в котором он был излучен, и его ширина составляет  $19 \pm 1.2$  мс на уровне 10% от максимума. За счет рассеяния в межзвездной среде импульс пульсара уширяется на 2 мс. Мощные импульсы локализованы строго на долготах главных компонентов среднего профиля. При этом во втором компоненте среднего профиля они генерируются в три раза чаще (на долготах второго компонента было обнаружено 43 события из 57). Распределение индивидуальных импульсов по пиковой плотности потока в единицах динамического среднего профиля демонстрирует наличие степенной хвоста. Распределение для импульсов с амплитудой больше чем 5.2 амплитуды динамического среднего профиля описывается степенной функцией с показателем степени  $-1.98$  ( $\chi_r^2 = 0.9$ ).

### 3.5. B0643+80

В 1998 г. у пульсара B0643+80 была обнаружена вспышка одного из компонентов среднего профиля [20]. Поскольку наблюдения проводились в режиме записи суммарного профиля, о природе зафиксированного явления нельзя было сделать окончательные выводы в рамках упомянутой работы. Впоследствии были выполнены повторные наблюдения в режиме записи индивидуальных импульсов в период с 2012 по 2014 г., которые показали, что пульсар B0643+80 генерирует мощные индивидуальные импульсы. При этом отдельные импульсы могут превосходить средний профиль пульсара по амплитуде в 170 раз [21]. Проанализированный нами массив наблюдений охватывает период с 2014 по 2016 г. и включает 87 сеансов наблюдений. В результате анализа было выявлено 240 индивидуальных импульсов с амплитудой свыше  $4\sigma_{\text{noise}}$ . В 117 случаях пиковая плотность потока индивидуального импульса превзошла пиковую плотность потока динамиче-

ского среднего профиля в 30 и более раз. Самое сильное зарегистрированное превышение составило 53 раза. Дисперсионное запаздывание данного индивидуального импульса в полосе 2.3 МГц составляет  $444.8 \pm 2.7$  мс. Данное запаздывание соответствует мере дисперсии  $31.6 \pm 3.76$  пк см<sup>-3</sup>. Мера дисперсии пульсара B0643+80 равна 33.3 пк см<sup>-3</sup> (см. табл. 1). По уровню 10% от максимума зарегистрированный импульс в 3 раза уже среднего профиля. Его ширина составляет  $13 \pm 1.2$  мс. Время рассеяния для данного пульсара на частоте 111 МГц, рассчитанное по формуле (6), составляет 0.8 мс и не вносит существенного вклада в итоговую форму импульса. Распределение данных импульсов по фазе повторяет распределение обычных импульсов. Согласно результатам работы [21] фиксируемые мощные индивидуальные импульсы пульсара B0643+80 не являются гигантскими импульсами, поскольку в распределении индивидуальных импульсов по пиковым плотностям потока отсутствует степенной хвост. Полученное нами распределение включает в себя слишком маленькую выборку индивидуальных импульсов и не позволяет делать строгих выводов на основании его формы. Однако стоит заметить, что из 86478 проанализированных периодов пульсара было обнаружено только 240 индивидуальных импульсов с  $S/N > 4\sigma_{\text{noise}}$ , что составляет 0.28% от полного числа периодов. При этом, за одну сессию наблюдений, включающую в себя 640 периодов пульсара, формируется устойчивый средний профиль. Это указывает на то, что регулярное излучение пульсара имеет амплитуды, находящиеся ниже порога уверенной регистрации антенной БСА ФИАН. Таким образом, в получаемом распределении отсутствует компонент “нормальных” импульсов, а вклад вносят только особенно сильные (по сравнению с регулярным излучением) импульсы. Это в свою очередь не противоречит основному выводу, сделанному в [21], что пульсар B0643+80 может быть вращающимся радиотранзиентом.

### 3.6. B0751+32

В обработанном массиве данных пульсара B0751+32 был обнаружен 81 индивидуальный импульс, чья амплитуда в 30 и более раз превзошла амплитуду динамического среднего профиля. Самое сильное зарегистрированное превышение составило 89 раз. Импульс зафиксирован на долготах второго компонента среднего профиля пульсара. Дисперсионное запаздывание данного импульса, рассчитанное между 111.8 и 109.5 МГц, равно  $549.4 \pm 3.8$  мс, что соответствует мере дисперсии  $39.01 \pm 2.51$  пк см<sup>-3</sup>, при мере дисперсии пульсара B0751+32, равной 40.0 пк см<sup>-3</sup>. Импульс в два раза уже соответствующего компонента

среднего профиля пульсара. Его ширина по уровню 0.1 составляет  $12.7 \pm 1.2$  мс, а за счет рассеяния в межзвездной среде импульс пульсара уширяется на 1.2 мс. Как и в случае пульсара В0525+21, время прихода мощных импульсов совпадает с фазами главных компонентов среднего профиля пульсара. В первом компоненте среднего профиля было зарегистрировано 36% мощных импульсов. Усредненный мощный импульс по форме полностью повторяет средний профиль, сформированный из обычных импульсов. Распределение импульсов по пиковой плотности потока имеет бимодальный характер с изломом на значении 22.7. Правая часть распределения описывается степенной функцией с показателем степени  $-2.09$  ( $\chi_r^2 = 0.5$ ).

### 3.7. В0823+26

От пульсара В0823+26 было зарегистрировано 2 индивидуальных импульса с пиковой плотностью потока, более чем в 30 раз превышающую пиковую плотность потока динамического среднего профиля пульсара. Первые исследования данного пульсара на низких частотах, проведенные в работе [22], уже отмечали наличие сильной модуляции интенсивности индивидуальных импульсов данного пульсара. Самое сильное зарегистрированное превышение, обнаруженное в настоящей работе, составило 33 раза. Дисперсионное запаздывание данного события в полосе 2.3 МГц составило  $279 \pm 6$  мс, что соответствует мере дисперсии  $19.8 \pm 4.0$  пк см<sup>-3</sup>. Мера дисперсии В0823+26 равна  $19.5$  пк см<sup>-3</sup> (см. табл. 1). Ширина зарегистрированного импульса на 30% уже ширины среднего профиля по уровню 10% и равна  $16.6 \pm 1.2$  мс. Время рассеяния для данного пульсара на частоте 111 МГц равно 0.2 мс и не сказывается на форме импульса. Распределение индивидуальных импульсов по пиковой плотности потока имеет сложный, многокомпонентный вид. Для импульсов с амплитудой меньше 3.7 амплитуд среднего профиля распределение имеет двугорбый вид, похожий на распределение пульсара В0138+59, полученное нами в настоящей работе. Далее следует излом, который описывается степенной функцией с показателем степени  $-3.16$  ( $\chi_r^2 = 1.1$ ) и повторяет вид распределения пульсара В0329+54.

### 3.8. В0917+63

От пульсара В0917+63 было зарегистрировано 2 индивидуальных импульса, имеющих пиковую плотность потока, в 30 и более раз превосходящую пиковую плотность потока динамического среднего профиля. Самое сильное из зарегистрированных превышений составило 31 раз. Диспер-

сионное запаздывание для данного события, рассчитанное между 111.8 и 109.5 МГц, равно  $163 \pm 3.4$  мс, что соответствует мере дисперсии  $14.2 \pm 2.2$  пк см<sup>-3</sup>. Мера дисперсии В0917+63 равна  $13.2$  пк см<sup>-3</sup>. Импульс в 3 раза уже компонента среднего профиля, в котором был излучен. Его ширина по уровню 0.1 составляет  $6.6 \pm 1.2$  мс. Время рассеяния для данного пульсара составляет 0.1 мс. Здесь следует отметить тот факт, что у пульсаров с двухкомпонентными средними профилями (В0525+21, В0751+32 и В0917+63) индивидуальные импульсы, продемонстрировавшие наибольшее превышение над средним профилем, были зарегистрированы на долготах вторых компонентов. При этом в случае пульсара В0917+63 в первом компоненте такие импульсы не были зафиксированы вовсе. Однако подобное может быть связано с малым количеством проведенных наблюдений. Распределение индивидуальных импульсов по пиковой плотности потока демонстрирует степенной хвост для импульсов с амплитудой больше 11.4 амплитуд среднего профиля. Данный участок распределения описывается степенной функцией с показателем степени  $-2.9$  ( $\chi_r^2 = 0.6$ ).

## 4. ВЫВОДЫ

Проведен анализ наблюдений 26 секундных пульсаров северного полушария, полученных на 111 МГц в период с 2012 по 2020 г.

От пульсаров В0011+47, В0450+55, В0525+21, В0751+32, В0823+26 и В0917+63 впервые были обнаружены индивидуальные импульсы, в 30 и более раз превосходящие динамический средний профиль пульсара по амплитуде. При этом пульсары В0450+55, В0525+21, В0751+32 демонстрируют также наличие степенного хвоста в распределении индивидуальных импульсов по пиковой плотности потока относительно средней плотности потока в сеансе, а регистрируемые импульсы в 2–3 раза уже динамических средних профилей данных пульсаров. Таким образом, данные импульсы удовлетворяют основным критериям ГИ, а пульсары В0450+55, В0525+21, В0751+32 являются кандидатами в пульсары с ГИ.

Подтверждена генерация индивидуальных импульсов, сильно превосходящих регулярное излучение от пульсара В0643+80.

На большой выборке данных, охватывающей 6 лет наблюдений, уточнен показатель степени для степенного хвоста распределения индивидуальных импульсов пульсара В0031–07 по пиковой плотности потока относительно средней плотности потока в сеансе.

У пульсаров В0138+59, В0823+26, В0919+06 и В2016+28 распределения индивидуальных им-

пульсаров по пиковой плотности потока относительно средней плотности потока в сеансе имеет двугорбый вид, который может свидетельствовать о наличии у этих пульсаров вспышечной активности.

Распределения индивидуальных импульсов пульсаров В0320+39, В1508+55, В1642–03, В2020+28, В2110+27 по пиковой плотности потока в единицах динамического среднего профиля демонстрируют наличие степенного хвоста несмотря на отсутствие сильных превышений индивидуальных импульсов над средним профилем у данных пульсаров.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Данная работа была поддержана грантом Фонда развития теоретической физики и математики “БАЗИС”, грант 18-1-2-51-1.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность программному комитету ПРАО АКЦ ФИАН за возможность проведения наблюдений на БСА ФИАН, В.А. Потапову и М.С. Пширкову за помощь в подготовке публикации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *W. Becker, M. Kramer, and A. Sesana*, Space Sci. Rev. **214**, id. 30 (2018).
2. *D. C. Backer*, Nature **46**, 42 (1970).
3. *D. H. Staelin and E. C. Reifenstein, III*, Science **162**, 1481 (1968).
4. *V. Soglasnov*, Proc. of the 363. *WE-Heraeus Seminar on Neutron Stars and Pulsars 40 years after the discovery*, edited by W. Becker and H. N. Huang, MPE-Report № 291 (Garching bei Munchen, Germany: Max Planck Institut fur extraterrestrische Physik), p. 68 (2007).
5. *M. A. McLaughlin, A. G. Lyne, D. R. Lorimer, M. Kramer, et al.*, Nature **439**, 817 (2006).
6. *S. L. Redman and J. M. Rankin*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **395**, 1529 (2009).
7. *B. J. Shapiro-Albert, M. A. McLaughlin, and E. F. Keane*, Astrophys. J. **866**, id. 152 (2018).
8. *S. C. Lundgren, J. M. Cordes, M. Ulmer, S. M. Matz, S. Lomatch, R. S. Foster, and T. Hankins*, Astrophys. J. **453**, 433 (1995).
9. *M. B. Mickaliger, A. E. McEwen, M. A. McLaughlin, and D. R. Lorimer*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **479**, 5413 (2018).
10. *S. B. Popov and M. S. Pshirkov*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. Letters **462**, L16 (2016).
11. *A. N. Kazantsev, V. A. Potapov, and G. B. Safronov*, Astron. Rep. **63**, 134 (2019).
12. *A. N. Kazantsev and V. A. Potapov*, Astron. Rep. **61**, 747 (2017).
13. *A. N. Kazantsev and V. A. Potapov*, Res. Astron. and Astrophys. **18**, id. 097 (2018).
14. *M. Pitkin*, J. Open Source Software **3**, 538 (2018).
15. *И. Ф. Малов*, *Радиопульсары* (М.: Наука, 2004).
16. *S. Xu and B. Zhang*, **835**, id. 2 (2017).
17. *А. Д. Кузьмин*, Труды ФИАН **199**, 147 (1989).
18. *E. A. Brylyakova and S. A. Tyul'bashev*, Astron. and Astrophys. **647**, id. A191 (2021).
19. *A. D. Kuzmin, A. A. Ershov, and B. Y. Losovsky*, Astron. Letters **30**, 247 (2004).
20. *В. М. Малофеев, О. И. Малов, Н. В. Щеголева*, Астрон. журн. **75**, 275 (1998).
21. *V. M. Malofeev, D. A. Teplykh, O. I. Malov, and S. V. Logvinenko*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **457**, 538 (2016).
22. *J. H. Taylor, M. Jura, and G. R. Huguenin*, Nature **223**, 797 (1969).