

## УГЛЫ МЕЖДУ МАГНИТНЫМ МОМЕНТОМ И ОСЬЮ ВРАЩЕНИЯ В РАДИОПУЛЬСАХ С ЖЕСТКИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

© 2023 г. М. А. Тимиркеева<sup>1\*</sup>, И. Ф. Малов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

Поступила в редакцию 15.09.2023 г.

После доработки 24.10.2023 г.; принята к публикации 21.11.2023 г.

Проведен сравнительный анализ углов  $\beta$  между осью вращения и магнитным моментом в трех группах радиопульсаров: источниках, в которых наблюдается только радиоизлучение, пульсарах с зарегистрированным рентгеновским излучением и радио-громких гамма-пульсарах. С этой целью отдельно для объектов из каждой группы двумя различными методами вычислены значения угла  $\beta$ . Оказалось, что в пульсарах с жестким излучением средние значения этого угла ( $28.2^\circ$  и  $28.8^\circ$ ) больше, чем для спокойных радиопульсаров ( $12.9^\circ$ ). Однако с применением критерия Колмогорова–Смирнова показано, что обнаруженное отличие не значимо с большой степенью вероятности. Следовательно, структура магнитосфер у трех рассмотренных групп пульсаров не сильно отличается, а их различие обусловлено величиной магнитного поля на световом цилиндре, которое обеспечивает включение механизма жесткого нетеплового излучения у пульсаров с обнаруженным рентгеновским и/или гамма-излучением, но недостаточно для этого у тихих в жестких диапазонах радиопульсаров.

*Ключевые слова:* нейтронные звезды, пульсары, наклоны осей.

**DOI:** 10.31857/S0320010823120070, **EDN:** RZMTON

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время известно более 3000 пульсаров, поиск новых источников регулярно ведется как в северном, так и в южном небе. В основном они излучают на радиочастотах и включены в пополняемый каталог ATNF (Манчестер и др., 2005<sup>1</sup>), порядка 300 объектов зарегистрированы как пульсары в гамма-диапазоне (см. публичный список гамма-пульсаров, обнаруженных с помощью Fermi/LAT<sup>2</sup>), нетепловое рентгеновское изучение зарегистрировано от нескольких десятков объектов (см. работы Принц, Бекер, 2015; Поссен-ти и др., 2002).

В работе Тимиркеевой и Малова (2020) рассматривались 4 группы изолированных пульсаров: в первой наблюдается только импульсное радиоизлучение — радио-громкие пульсары, считающиеся тихими в рентгеновском и гамма-диапазонах (R-группа); во второй радиопульсары с зарегистрированным гамма-излучением — радио-громкие гамма-пульсары ( $\gamma + R$  пульсары); третья

состоит из радиопульсаров с зарегистрированным рентгеновским излучением — радио-громкие рентгеновские пульсары (X + R пульсары); четвертая — гамма-пульсары без зарегистрированного радиоизлучения — радио-тихие гамма-пульсары (группа  $\gamma$ ). По результатам анализа сделан вывод о том, что пульсары с зарегистрированным жестким излучением обладают более сильными магнитными полями на световом цилиндре и более высокой скоростью потерь энергии вращения ( $10^4$  Гс и  $10^{35}$  эрг/с), чем характерные значения ( $10^2$  Гс и  $10^{32}$  эрг/с) у обычных радиопульсаров. В работе Малова и Тимиркеевой (2019) показано, что жесткое излучение генерируется на периферии магнитосферы за счет синхротронного механизма.

Один из важнейших параметров, определяющих геометрию магнитосферы пульсара и протекающие в ней физические процессы, — угол  $\beta$  между осью вращения и вектором магнитного момента  $\mu$ . Этот параметр позволяет понять не только специфику излучения конкретного радиопульсара, но также построенные распределения углов для объектов, излучающих в разных диапазонах, могут установить четкие различия в исследуемых группах. Угол между магнитным моментом и осью вращения также является ключевым для проверки предлагаемых моделей излучения пульсаров. Данное исследова-

\* Электронный адрес: [timirkееva@prao.ru](mailto:timirkееva@prao.ru)

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

<sup>2</sup> <https://confluence.slac.stanford.edu/display/GLAMCOG/Public+List+of+LAT-Detected+Gamma-Ray+Pulsars>

ние посвящено вычислению углов между магнитным моментом и осью вращения в радиопульсарах, излучающих также в гамма- и рентгеновском диапазонах.

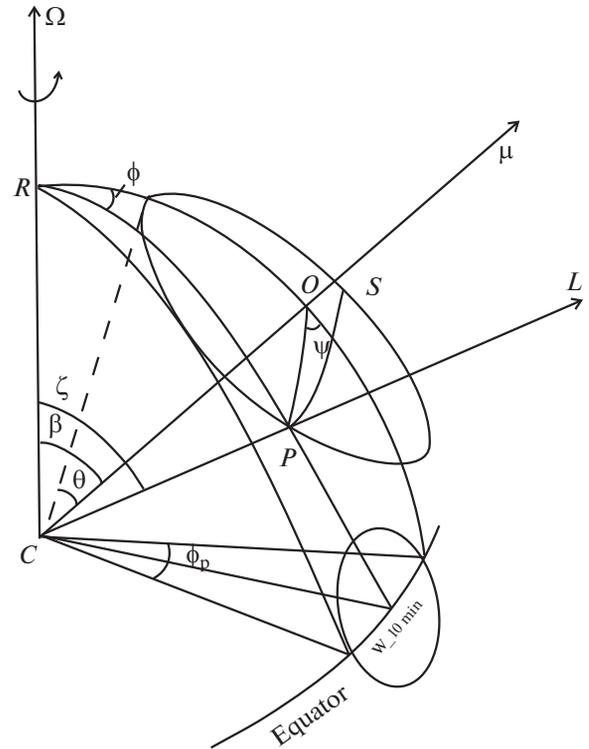
Для последующего анализа были сформированы три группы пульсаров: в первую группу входят только радио-громкие пульсары ( $\sim 1500$ , см. опубликованную таблицу на сайте ПРАО АКЦ ФИАН в разделе Online data<sup>3</sup>); вторая группа — это радиопульсары с зарегистрированным гамма-излучением — радио-громкие гамма-пульсары (см. опубликованную табл. 3<sup>3</sup>; третья группа состоит из рентгеновских радиопульсаров (см. опубликованную табл. 4<sup>3</sup>). Из выборки исключены пульсары, находящиеся в двойных системах и шаровых скоплениях, для того чтобы избежать влияния компаньонов.

Цель работы заключалась в получении новых результатов на расширенных выборках, построенных на данных из работ по исследованию рентгеновских радиопульсаров (Принц, Бекер, 2015; Поссенти и др., 2002), каталога радиопульсаров ATNF<sup>1</sup> и опубликованных данных Fermi/LAT<sup>2</sup>. Были вычислены значения углов по наблюдаемой ширине импульса на уровне 10% для нескольких сотен известных радиопульсаров. В данной работе анализ структуры магнитосферы также проводился на основе оценок углов  $\beta$  по поляризационным исследованиям на частоте 1400 МГц, полученным для 600 пульсаров в работе Джонстона и Керра (2018). Такие оценки, в совокупности с оценками на основе других методов, могут дать информацию об ориентации осей в пульсарах и послужить дальнейшему развитию теоретических представлений о структуре магнитосферы пульсара.

Значения угла  $\beta$  в работе Никитиной и Малова (2017) получены по данным различных каталогов и строились на разнородных и ограниченных выборках. За прошедшие годы число известных пульсаров удвоилось, были дополнительно проведены измерения поляризационных характеристик более чем 600 радиопульсаров. С увеличением выборки естественным образом появилась необходимость новых вычислений угла  $\beta$ .

Статья организована следующим образом: в разделе 1 приводятся описание выборки и сравнение с ранними работами, в разделе 2 дается описание методов, приводится сравнительный результат для всех выборок, раздел 3 посвящен анализу результатов, в приложении 4 приведены выборки радиопульсаров с указанием опубликованных таблиц на сайте ПРАО АКЦ ФИАН.

<sup>3</sup> <https://www.prao.ru/online\%20data/onlinedata.html>



**Рис. 1.** Геометрия конуса излучения в модели полярной шапки: излучение ограничено конусом открытых силовых линий,  $\mu$  — вектор магнитного момента,  $L$  — направление на наблюдателя. Основные угловые параметры, определяющие структуру и наблюдаемые особенности:  $\beta$  — угол между вектором магнитного момента и осью вращения,  $\zeta$  — угол между лучом зрения и осью вращения,  $\phi$  — текущая долгота,  $\phi_p$  — половина формирующегося импульса,  $\psi$  — позиционный угол, отсчитываемый от центрального меридиана,  $\theta$  — угловой радиус конуса излучения.

## 2. СПОСОБЫ ВЫЧИСЛЕНИЯ УГЛОВ МЕЖДУ ОСЯМИ В РАДИОПУЛЬСАРАХ

При проведении вычислений использовалась стандартная общепринятая модель магнитосферы пульсара: излучение ограничено конусом открытых силовых линий (см. рис. 1). С помощью сферической тригонометрии можно записать уравнение связывающее между собой параметры  $\theta$ ,  $\beta$ ,  $\zeta$ :

$$\cos \theta = \cos \beta \times \cos \zeta + \sin \beta \times \sin \zeta \times \cos \phi_p. \quad (1)$$

Здесь  $\beta$  — угол между магнитной осью и осью вращения,  $\zeta$  — угол между лучом зрения наблюдателя и осью вращения,  $\theta$  — угловой радиус конуса излучения,  $\phi_p$  — половина угловой наблюдаемой ширины импульса.

### 2.1. Случай прохождения луча зрения через центр конуса излучения, — $\beta = \zeta$

Наиболее простым решение уравнения (1) будет в случае прохождения луча зрения через центр

конуса излучения, —  $\beta = \zeta$ , — уравнение (1) преобразуется к виду

$$\cos \theta = \cos^2 \beta + \sin^2 \beta \times \cos \phi_p. \quad (2)$$

Вместо  $\phi_p$  следует использовать  $W_{10}/2$ ,  $W_{10}$  берется из каталога Манчестера и др. (2005).  $W_{10}$  — длительность импульса на уровне 10% максимальной интенсивности импульса (приводится в каталоге в мс). Ширина импульса зависит как от частоты наблюдения (см. ссылки на оригинальные работы в ATNF), так и от временного разрешения наблюдений. Нами использовалось значение из каталога ATNF. Ширины импульсов составляют от 0.01 до 0.1 периода. Однако у некоторых пульсаров излучение наблюдается в значительной части периода (см., например, PSR J1828-1101, приведенный в табл. 4, для которого  $W_{10} \simeq 0.7P$ ).

В табл. 3<sup>3</sup> и 4<sup>3</sup>, а также в таблице радиопульсаров, опубликованной только на сайте ПРАО АКЦ ФИАН<sup>3</sup>, указаны исходные параметры радиопульсаров:  $P$  (мс),  $W_{10}$  (мс) и ширина импульса по половинной интенсивности  $W_{50}$  (мс).

Построив статистическую зависимость наблюдаемой шириной на уровне 10% от периода радиопульсара (см. рис. 2), можно определить нижнюю границу  $W_{10\min}$  на диаграмме, чтобы получить

$$\theta_1 = \frac{W_{10\min}}{2}. \quad (3)$$

Предположив равенство углов  $\beta$  и  $\zeta$  и учтя соотношения (2) и (3), получаем

$$\sin \beta = \frac{\sin \theta_1/2}{\sin W_{10}/4}. \quad (4)$$

Углы, вычисленные таким образом, во всех таблицах обозначены как  $\beta_1$ . Следует отметить, что по формуле (4) полученные положительные значения  $\sin \beta$  могут соответствовать как первому, так и второму квадранту, т.е.  $\beta$  может быть равно  $180^\circ - \beta_1$ . Мы приводим углы  $\beta_1$ , считая их меньше  $90^\circ$ .

Уравнения, связывающие период и ширину профиля, можно записать в виде:

$$W_{10} = 2\theta = 0.38 \times P^{0.69}, \quad K = 0.74 \quad (5)$$

$$W_{10\min} = 0.11 \times P^{0.62}$$

для радиопульсаров,

$$W_{10} = 2\theta = 0.27 \times P^{0.80}, \quad K = 0.86 \quad (6)$$

$$W_{10\min} = 0.07 \times P^{0.83}$$

для рентгеновских радиопульсаров,

$$W_{10} = 2\theta = 0.34 \times P^{0.75}, \quad K = 0.84 \quad (7)$$

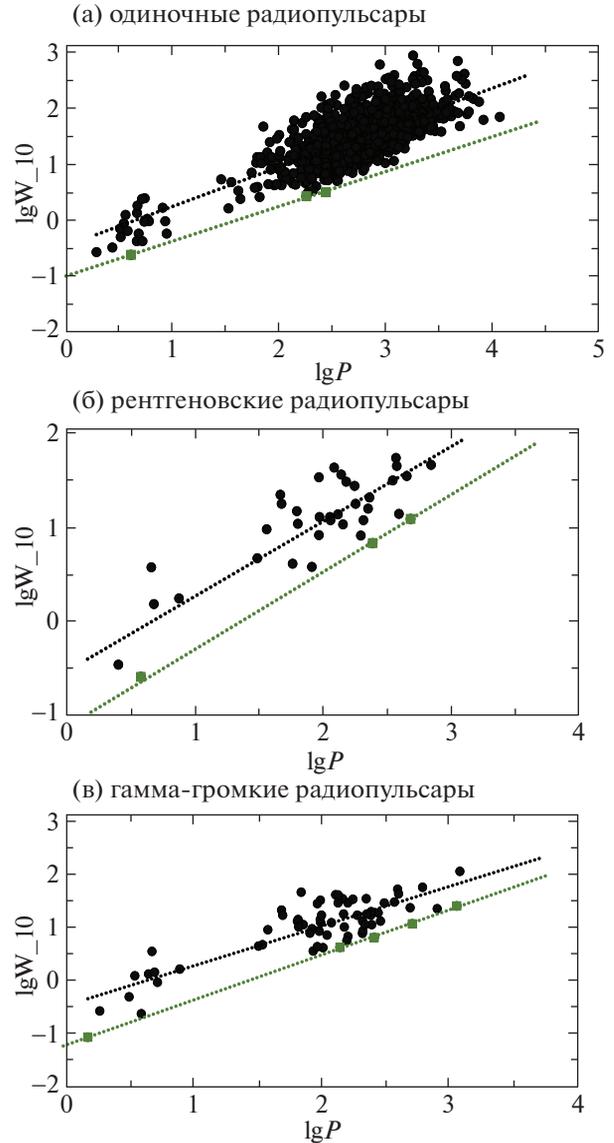


Рис. 2. Зависимость наблюдаемой ширины на уровне 10% от периода пульсара.

$$W_{10\min} = 0.06 \times P^{0.85}$$

для гамма-громких радиопульсаров. Уравнение нижней границы также приведено.

На рисунках прямые приведены в логарифмических масштабах, они вписаны по методу наименьших квадратов в весь массив с указанием коэффициентов корреляции  $K$ .

Распределения вычисленных значений представлены на рис. 3.

Средние значения углов между осью вращения и магнитной осью — в предположении о прохождении луча зрения через конус излучения — для радиопульсаров с зарегистрированным жестким излучением  $\beta = 24^\circ$  (среднеквадратичный разброс

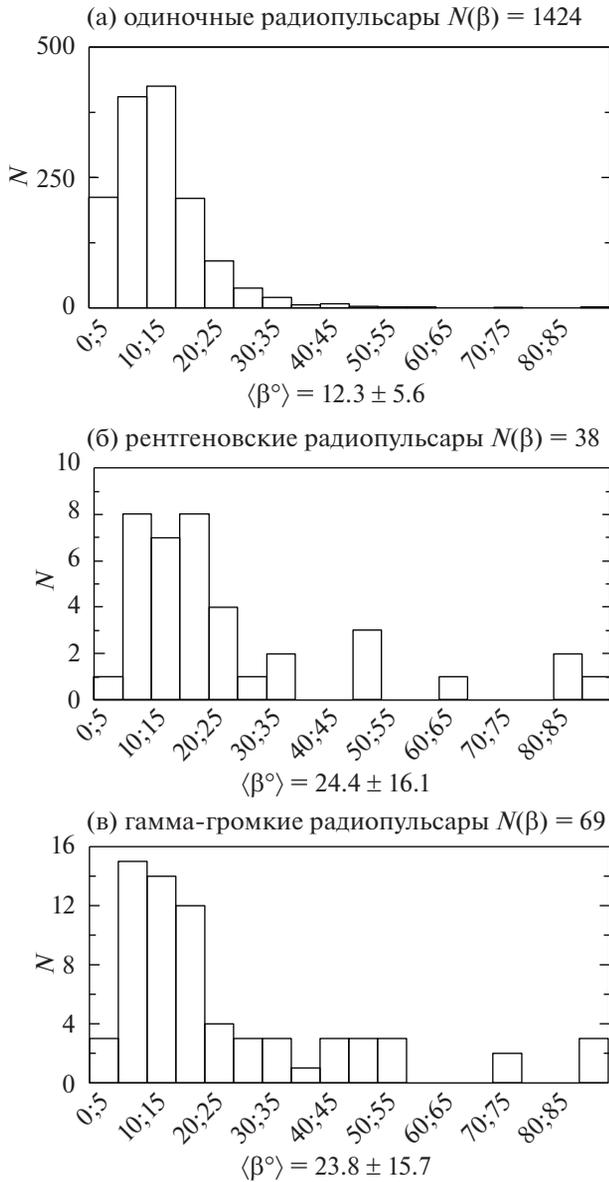
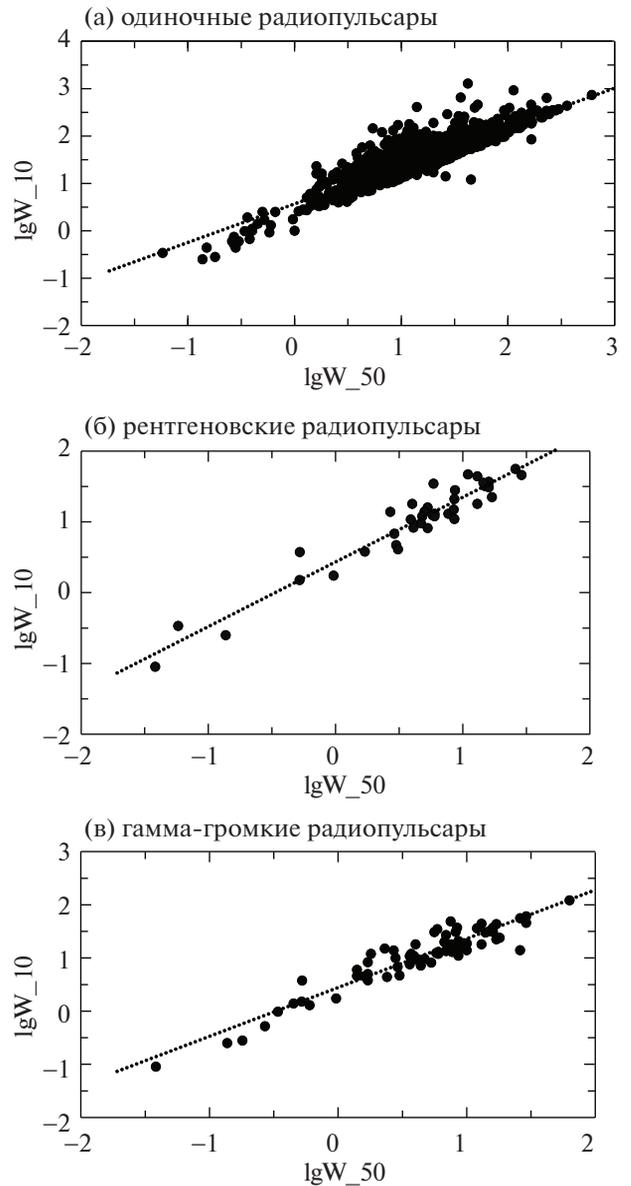


Рис. 3. Гистограммы распределения углов.

$16^\circ$ ), по сравнению с обычными радиопульсарами без зарегистрированного рентгеновского и/или гамма-излучения  $\beta = 12^\circ \pm 6$ , но перекрываются в пределах указанных среднеквадратичных уклонений. Эти значения можно считать нижним пределом реального угла  $\beta$ .

Согласно обновляемому каталогу ATNF,  $W_{50}$  измерено у большего количества пульсаров в исследуемых выборках, чем  $W_{10}$ . Имеет смысл построить график зависимости  $W_{10}(W_{50})$  для получения уравнения связи ширин (см. рис. 4) и использовать эти значения  $W_{10}$  для дальнейшего анализа. Прямая, вписанная по методу наименьших квадратов, имеет вид

$$\lg W_{10} = (0.81 \pm 0.01) \lg W_{50} + 0.57 \pm 0.01, \quad (8)$$

Рис. 4. Зависимость  $W_{10}$  от  $W_{50}$ .

$$K = 0.89$$

для радиопульсаров,

$$\lg W_{10} = (0.91 \pm 0.05) \lg W_{50} + 0.43 \pm 0.04, \quad (9)$$

$$K = 0.96$$

для рентгеновских радиопульсаров,

$$\lg W_{10} = (0.92 \pm 0.04) \lg W_{50} + 0.44 \pm 0.03, \quad (10)$$

$$K = 0.94$$

для гамма-громких радиопульсаров.

Для радиопульсаров, у которых нет измеренной ширины на уровне 10%, следует брать указанную в каталоге ATNF ширину  $W_{50}$ , по соотношениям (8)–(10) получить оценку  $W_{10}$ . Вычисленные значения  $W_{10}$  указаны в скобках в табл. 3<sup>3</sup> и 4<sup>3</sup>, а

также в таблице радиопульсаров, опубликованной только на сайте ПРАО АКЦ ФИАН<sup>3</sup>.

## 2.2. Вычисление угла $\beta$ по ширине профиля и максимальной производной позиционного угла

Второй метод вычисления угла между осью вращения и магнитной осью основан на поляризационных данных. В случае излучения кривизны электрический вектор лежит в плоскости магнитной силовой линии, а само излучение поляризовано параллельно проекции оси магнитного диполя. Из рис. 1 следует, что зависимость позиционного угла  $\psi$  плоскости поляризации от долготы  $\phi$  можно определить с помощью сферической тригонометрии как

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\sin \beta \times \sin \phi}{\sin \zeta \times \cos \beta - \cos \zeta \times \sin \beta \times \cos \phi}. \quad (11)$$

Излучение генерируется в магнитосфере пульсара, распространение излучения не вносит существенных искажений в поляризационные характеристики. Вместо уравнения (11) используют, как правило, максимальную производную позиционного угла

$$C = \left( \frac{d\psi}{d\phi} \right)_{\max} = \frac{\sin \beta}{\sin(\zeta - \beta)}, \quad (12)$$

поскольку функция  $\psi(\phi)$  ограничена узким интервалом долгот  $\phi$  в пределах среднего импульса.

Джонстон и Керр (2018) использовали архивные и современные поляризационные данные для 600 радиопульсаров с периодами от 36 до 8500 мс наблюдаемых в Парксе на частоте 1400 МГц. Поляризационные измерения проведены, как правило, в пределах главного импульса. Немонотонное поведение позиционного угла линейной поляризации делает невозможным оценку параметра  $C$  и значительно сокращает исходную выборку до  $\sim 220$  радиопульсаров. В табл. 3<sup>3</sup> и 4<sup>3</sup>, а также в таблице радиопульсаров на сайте ПРАО АКЦ ФИАН<sup>3</sup>, приведен вычисленный параметр  $C$  в соответствующем столбце.

Соотношение (12) можно переписать в виде

$$\sin \beta = C \times \sin(\zeta - \beta). \quad (13)$$

Очевидно, что  $\zeta - \beta < \theta$ . Поэтому можно записать:  $\sin \beta < C \sin(\theta)$ . Подставляя в это выражение значение  $\theta$ , определяемое из статистической зависимости  $W_{10}(P)$  (см. уравнения (5)–(7)), мы получим верхний предел на величину  $\beta$ , который далее обозначен как  $\beta_2$ . Значения  $\theta$  в градусах также приведены во всех таблицах.

Использование данных о максимальной производной  $C = \left( \frac{d\psi}{d\phi} \right)_{\max}$  позиционного угла позволя-

ет сделать оценки угла  $\beta$  для трех групп радиопульсаров — средние значения углов перекрываются с учетом среднеквадратичного разброса:

$\langle \beta \rangle = 29^\circ \pm 18^\circ$  для радиопульсаров без зарегистрированного жесткого излучения,

$\langle \beta \rangle = 48^\circ \pm 25^\circ$  для рентгеновских радиопульсаров,

$\langle \beta \rangle = 50^\circ \pm 24^\circ$  для гамма-громких радиопульсаров.

Найденные значения в табл. 3<sup>3</sup> и 4<sup>3</sup>, а также в таблице радиопульсаров, опубликованной только на сайте ПРАО АКЦ ФИАН<sup>3</sup>, обозначены как  $\beta_2$  и являются верхним пределом реального угла  $\beta$ .

Для некоторых пульсаров измеренное значение  $C$  велико и, в свою очередь, ведет к углам  $\beta_2 \simeq 90^\circ$ , эти углы также приведены во всех таблицах в скобках. Для пульсаров с большими значениями  $C$  ( $C > 5$ ) углы  $\beta_2$  не вычислялись. Соответствующие распределения представлены на рис. 5.

Как отмечено выше, значения  $\beta_1$  можно рассматривать как нижний предел реального угла  $\beta$ , для некоторых пульсаров эти оценки могут быть единственно возможными. Значения  $\beta_2$  лучше описывают наклон осей в пульсарах и их можно рассматривать как верхний предел реального угла  $\beta$ . Мы в дальнейшем берем  $\langle \beta \rangle$  как среднее арифметическое между двумя оценками  $\beta_1$  и  $\beta_2$ :

$$\langle \beta \rangle = \frac{\beta_1 + \beta_2}{2}. \quad (14)$$

Распределение полученных значений представлено на рис. 6.

Ошибка определения углов  $\beta_1$  и  $\beta_2$  напрямую связана с использованием статистических зависимостей для ширины наблюдаемых импульсов. Предварительные оценки ошибок в определении углов оказались значительно меньше, чем приведенные среднеквадратичные отклонения.

## 2.3. Критерий Колмогорова–Смирнова

Количество пульсаров в трех выборках сильно различно. С помощью критерия Колмогорова–Смирнова можно проанализировать согласованность полученных распределений. Сравнивая расчетные значения

$$\lambda = d_{\max} \left( \frac{N_1 \times N_2}{N_1 + N_2} \right)^{1/2},$$

с теоретическими квантилями, оценим вероятности согласованности  $p$  гистограмм распределения углов на рис. 3 и 6. Эти вероятности приведены в табл. 1 и 2.

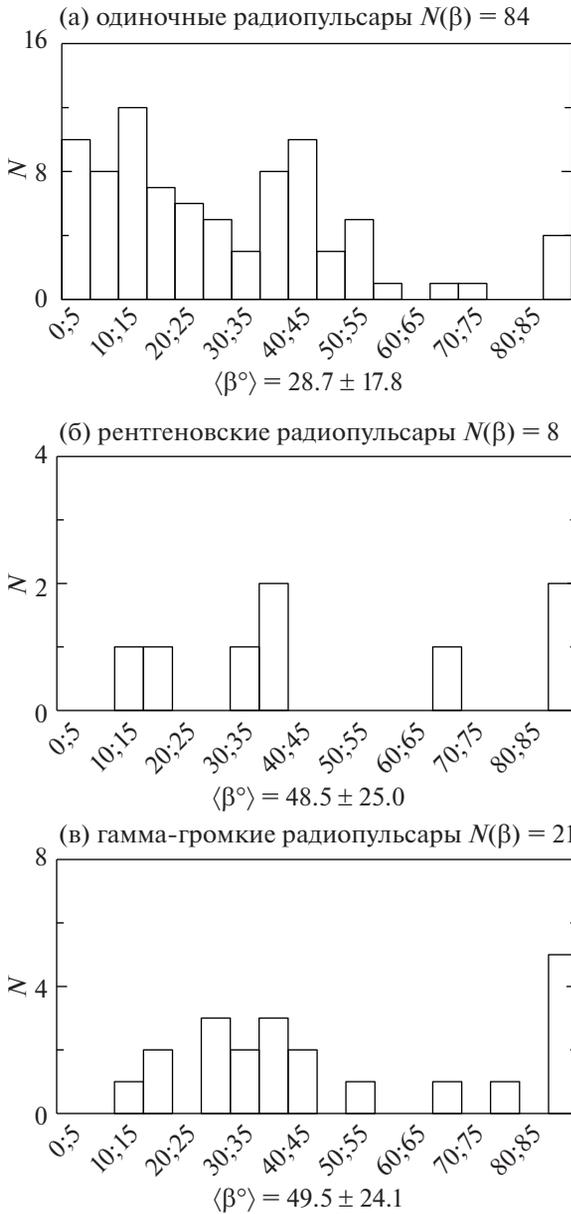


Рис. 5. Распределение углов с использованием поляризационных данных.

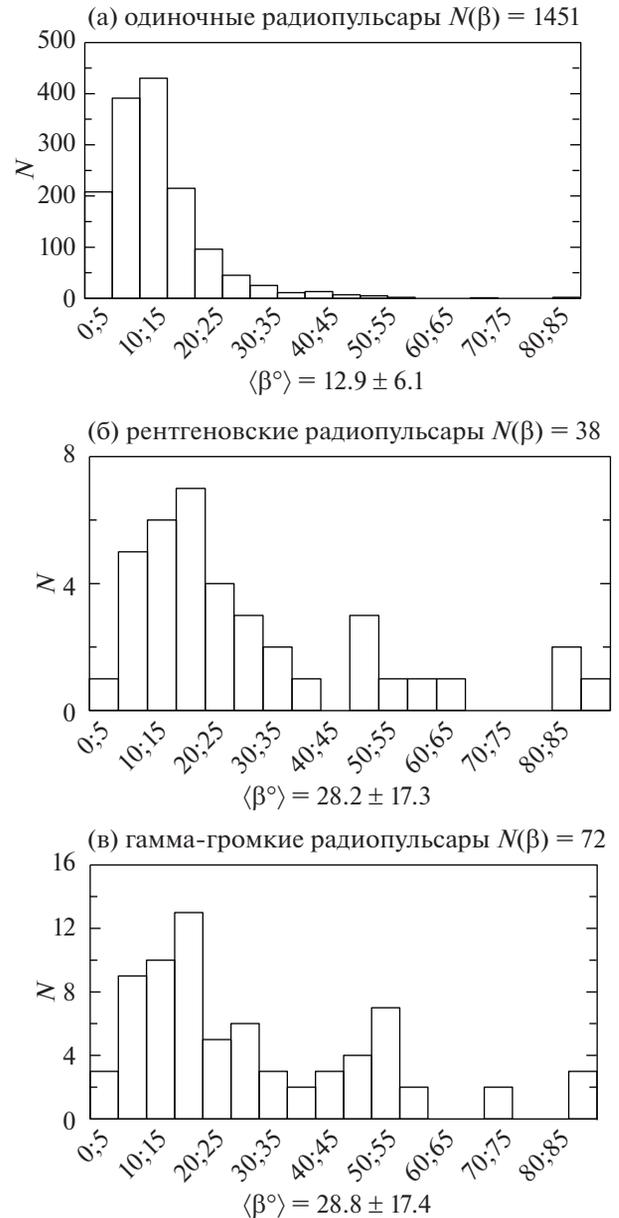


Рис. 6. Распределение средних углов.

Для рис. 5 оценки идентичности гистограмм не включены в работу в виду скудности объектов с рентгеновским и гамма-излучением.

Таблица 1. Критерий Колмогорова–Смирнова для рис. 3

Sample	$\lambda$	$p$
R и $\gamma + R$	0.54	0.94
R и X + R	0.62	0.82
X + R и $\gamma + R$	0.27	$\gg 0.99$

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ всех результатов по определению угла  $\beta$  в радиопульсарах служит одним из путей выбора

Таблица 2. Критерий Колмогорова–Смирнова для рис. 6

Sample	$\lambda$	$p$
R и $\gamma + R$	0.80	0.55
R и X + R	0.70	0.71
X + R и $\gamma + R$	0.36	$\gg 0.99$

Таблица 3. Выборка рентгеновских радиопульсаров с измеренными ширинами на уровне 10 и 50%

№	PSR J	P msec	$W_{50}$ msec	$W_{10}$ msec	$\beta_1$ deg	$\theta$ deg	C	$\beta_2$ deg	$\langle\beta\rangle$ deg
1	J0117+5914	101.44	4.1	8.3	22.31	19.68			22.31
2	J0205+6449	65.72	2.3	(5.74)		21.47			
3	J0358+5413	156.38	3.9	10.8	24.64	18.05			24.64
4	J0534+2200	33.39	3	4.7	15.60	24.58			15.60
5	J0538+2817	143.16	2.7	13.9	17.56	18.37			17.56
6	J0540-6919	50.57	16.98	22.47	4.90	22.62			4.90
7	J0543+2329	245.97	5.3	16	24.15	16.49	3.8	(90)	57.07
8	J0659+1414	384.93	15	32	17.25	15.07	2.2	34.90	26.07
9	J0826+2637	530.66	5.8	12.4	84.29	14.14			84.29
10	J0835-4510	89.33	1.7	3.8	48.14	20.19	7.7		48.14
11	J0922+0638	430.63	5	14	47.88	14.74	5.5		47.88
12	J0953+0755	253.07	8.6	21	18.63	16.39			18.63
13	J1024-0719	5.16	0.521	1.51	10.59	35.70			10.59
14	J1048-5832	123.73	7.7	13	16.62	18.91	5.1		16.62
15	J1057-5226	197.11	13	18	17.66	17.23			17.66
16	J1105-6107	63.20	3.1	4.1	31.27	21.63	5.3		31.27
17	J1112-6103	64.96	11	(23.86)		21.51			
18	J1119-6127	407.96	26	56	10.29	14.90	2.3	36.25	23.27
19	J1124-5916	135.48	10	(21.88)		18.57			
20	J1224-6407	216.48	5.3	8.2	45.84	16.91	18		45.84
21	J1301-6310	663.83	12	(25.83)		13.52			
22	J1341-6220	193.34	8.7	28	11.12	17.30	4.3	(90)	50.56
23	J1357-6429	166.11	16	31	8.89	17.83	1.1	19.68	14.29
24	J1420-6048	68.18	8.5	15	8.85	21.31	2.5	65.29	37.07
25	J1513-5908	151.58	16	37	6.97	18.16	0.8	14.44	10.70
26	J1617-5055	69.36	8.6	11	12.17	21.24			12.17
27	J1709-4429	102.46	6	13	14.20	19.64	1.8	37.23	25.71
28	J1730-2304	8.12	0.965	1.74	13.19	32.61			13.19
29	J1741-2054	413.70	29	45.96	12.68	14.86			12.68
30	J1744-1134	4.07	0.137	0.25	61.93	37.43			61.93
31	J1747-2958	98.81	7	(15.81)		19.78			
32	J1801-2451	124.92	4.8	12	18.19	18.88	5.3		18.19
33	J1803-2137	133.67	13	44	5.38	18.62	12.1		5.38
34	J1825-0935	769.02	11	47	20.93	13.12			20.93
35	J1826-1334	101.49	5.9	34.7	5.46	19.68	8.2		5.46
36	J1832-0836	2.72	0.058	0.339	27.90	40.59			27.90
37	J1856+0113	267.44	2.9	6.8	88.29	16.21			88.29
38	J1932+1059	226.52	6	12	30.61	16.76			30.61
39	J1939+2134	1.56	0.0382	0.09	83.89	45.37			83.89
40	J1952+3252	39.53	4.7	9.6	8.85	23.76			8.85
41	J2124-3358	4.93	0.524	3.76	5.06	36.03			5.06
42	J2229+6114	51.62	4	18	6.03	22.53			6.03
43	J2337+6151	495.37	14.5	35.7	19.09	14.33			19.09
Среднее					24.40			48.47	28.17
Среднеквадратичное отклонение					16.12			24.97	17.31

Таблица 4. Выборка радио-громких гамма-пульсаров с измеренными ширинами на уровне 10 и 50%

№	PSR J	P msec	$W_{50}$ msec	$W_{10}$ msec	$\beta_1$ deg	$\theta$ deg	C	$\beta_2$ deg	$\langle\beta\rangle$ deg
1	J0205+6449	65.72	2.30	(5.93)		21.92			
2	J0248+6021	217.09	26.00	14	25.65	16.26			25.65
3	J0358+5413	156.38	3.90	10.8	25.10	17.65			25.10
4	J0514-4408	320.27	5.60	30.6	16.05	14.75			16.05
5	J0534+2200	33.39	3.00	4.7	15.24	25.96			15.24
6	J0540-6919	50.57	16.98	22.47	4.84	23.40			4.84
7	J0630-2834	1244.42	63.00	122	12.75	10.51	3.6	41.04	26.90
8	J0631+0646	110.98	21.00	(45.34)		19.23			
9	J0631+1036	287.80	6.70	20	22.67	15.15	4.6	(90)	56.34
10	J0659+1414	384.93	15.00	32	18.00	14.09	2.2	32.38	25.19
11	J0729-1448	251.66	7.60	18	22.46	15.67	5.2		22.46
12	J0729-1836	510.16	14.00	25	30.13	13.13			30.13
13	J0742-2822	166.76	4.40	7.2	42.17	17.37	5.4		42.17
14	J0826+2637	530.66	5.80	12.4	87.37	13.00			87.37
15	J0835-4510	89.33	1.70	3.8	48.32	20.30	7.7		48.32
16	J0908-4913	106.77	2.40	4.4	48.68	19.42			48.68
17	J0931-1902	4.64	0.45	1.4	9.71	42.53			9.71
18	J0940-5428	87.55	2.80	10	16.28	20.40	3.4	(90)	53.14
19	J0953+0755	253.07	8.60	21	19.22	15.65			19.22
20	J1019-5749	162.50	47.00	(95.13)		17.48			
21	J1024-0719	5.16	0.52	1.51	9.84	41.41			9.84
22	J1028-5819	91.40	0.10	(0.33)		20.19	2.3	52.53	52.53
23	J1048-5832	123.73	7.70	13	16.82	18.71	5.1		16.82
24	J1055-6028	99.66	3.70	9	20.31	19.75	2.9	78.56	49.43
25	J1057-5226	197.11	13.00	18	18.09	16.66			18.09
26	J1119-6127	407.96	26.00	56	10.75	13.89	2.3	33.51	22.13
27	J1124-5916	135.48	10.00	(22.91)		18.29	18		
28	J1151-6108	101.63	6.90	13.55	13.61	19.66			13.61
29	J1221-0633	1.93	0.18	0.28	22.81	52.95			22.81
30	J1224-6407	216.48	5.30	8.2	47.42	16.27			47.42
31	J1253-5820	255.50	3.70	12	35.43	15.61	10.4		35.43
32	J1357-6429	166.11	16.00	31	9.06	17.38	1.1	19.19	14.13
33	J1410-6132	50.05	17.00	(37.33)		23.46			
34	J1420-6048	68.18	8.50	15	8.81	21.72	2.5	67.69	38.25
35	J1509-5850	88.92	3.40	(8.49)		20.32	0.8	16.13	16.13
36	J1513-5908	151.58	16.00	37	7.09	17.79	0.8	14.15	10.62
37	J1531-5610	84.21	1.70	8.3	19.04	20.60	1.4	29.52	24.28
38	J1614-5048	231.69	8.40	37	10.06	16.00	6.7		10.06
39	J1617-5055	69.36	8.60	11	12.12	21.63			12.12
40	J1702-4128	182.14	12.00	36	8.45	16.99	1.5	25.99	17.22
41	J1705-1906	298.99	8.20	14	34.63	15.01			34.63
42	J1709-4429	102.46	6.00	13	14.29	19.62	1.8	37.18	25.74
43	J1718-3825	74.67	1.80	12	11.83	21.23	3	(90)	50.91
44	J1730-2304	8.12	0.97	1.74	12.41	36.97			12.41
45	J1730-3350	139.46	8.20	31	7.85	18.16			7.85
46	J1731-4744	829.83	18.00	24	52.31	11.63			52.31
47	J1734-3333	1169.34	230.60	(410.99)		10.67			

Таблица 4. Окончание

№	PSR J	P msec	$W_{50}$ msec	$W_{10}$ msec	$\beta_1$ deg	$\theta$ deg	C	$\beta_2$ deg	$\langle\beta\rangle$ deg
48	J1739-3023	114.37	3.60	7.6	27.49	19.09	3.8	(90)	58.74
49	J1740+1000	154.09	6.90	19	13.84	17.71	1.4	25.21	19.52
50	J1741-2054	413.70	29.00	45.96	13.26	13.84			13.26
51	J1744-1134	4.07	0.14	0.25	54.66	43.93			54.66
52	J1757-2421	234.11	10.00	19	19.90	15.96			19.90
53	J1801-1417	3.63	0.60	1.3	8.60	45.23			8.60
54	J1803-2137	133.67	13.00	44	5.46	18.36	12.1		5.46
55	J1816-0755	217.64	4.20	9.1	41.81	16.25			41.81
56	J1819-1458	4263.21	154.00	(283.48)		7.72			
57	J1823-3021A	5.44	0.34	0.98	15.63	40.87			15.63
58	J1826-1334	101.49	5.90	34.7	5.49	19.66	8.2		5.49
59	J1828-1101	72.06	7.50	49	3.37	21.42			3.37
60	J1831-0952	67.27	10.00	14	9.32	21.79	1.8	41.93	25.63
61	J1833-1034	61.88	2.30	(5.93)		22.25			
62	J1837-0604	96.29	14.00	30	6.02	19.92	1.7	35.40	20.71
63	J1841-0524	445.75	16.00	(35.30)		13.58	2.7	39.35	19.68
64	J1843-1113	1.85	0.25	(0.77)		53.55			
65	J1853-0004	101.44	2.30	15	12.28	19.67	3.1	(90)	51.14
66	J1856+0113	267.44	2.90	6.8	86.38	15.43			86.38
67	J1857+0143	139.76	17.00	43.42	5.72	18.15			5.72
68	J1913+0904	163.25	1.40	6	52.28	17.46			52.28
69	J1913+1011	35.91	1.70	5	15.24	25.50			15.24
70	J1918+1444	1181.02	6.90	27	71.87	10.65			71.87
71	J1925+1720	75.66	2.70	(6.87)		21.16			
72	J1928+1746	68.73	3.60	10.88	12.16	21.68			12.16
73	J1930+1852	136.86	19.20	(41.75)		18.25			
74	J1932+1059	226.52	6.00	12	31.55	16.09			31.55
75	J1932+2220	144.47	1.60	4.5	71.83	18.00			71.83
76	J1939+2134	1.56	0.04	0.09	85.84	55.87			85.84
77	J1952+3252	39.53	4.70	9.6	8.69	24.89			8.69
78	J2006+3102	163.70	11.80	(26.68)		17.45			
79	J2021+3651	103.74	9.90	18	10.44	19.56			10.44
80	J2039-3616	3.27	0.27	0.52	19.14	46.41			19.14
81	J2043+2740	96.13	1.40	4.6	41.07	19.93			41.07
82	J2124-3358	4.93	0.52	3.76	4.70	41.88			4.70
83	J2208+4056	636.96	29.00	61	14.44	12.42			14.44
84	J2229+6114	51.62	4.00	18	5.96	23.28			5.96
85	J2240+5832	139.93	10.00	(22.91)		18.15			
Среднее					23.80			49.51	28.78
Среднеквадратичное отклонение					15.72			24.06	17.39

адекватной модели излучения. В работе Никитиной и Малова (2017) оценки угла  $\beta$  были получены по данным из различных каталогов по ограниченным и разнородным выборкам радиопульсаров. По состоянию на 2023 г. выборка увеличилась в 2 раза и требуются новые вычисления. В настоящей работе были вычислены значения углов между осью вращения и магнитным диполем для нескольких сотен пульсаров.

Сравнительный анализ радиопульсаров с зарегистрированным жестким излучением и источников, излучающих только в радиодиапазоне, — в предположении о прохождении луча зрения через конус излучения — привел к следующим выводам:

- Радиопульсары с зарегистрированным жестким излучением, в среднем, обладают большими значениями углов между осью вращения и магнитной осью —  $\langle\beta_1\rangle = 24^\circ$ , по сравнению с обычными радиопульсарами без зарегистрированного рентгеновского и/или гамма-излучения  $\langle\beta_1\rangle = 12^\circ$ .

- Согласно критерию Колмогорова—Смирнова гистограммы распределения  $N(\beta_1)$  для трех групп радиопульсаров не различаются с вероятностью более 80%.

- Полученные значения  $\beta_1$  можно рассматривать как нижний предел реального угла  $\beta$ .

Использование поляризационных данных из работы Джонстона и Керра (2018) позволило провести новые вычисления угла  $\beta$ .

- Полученные значения  $\beta_2$ , определенные по ходу позиционного угла, можно рассматривать как верхний предел реального угла  $\beta$ .
- Среднее значение угла оказывается близким для групп X + R и  $\gamma$ + R  $\langle\beta_2\rangle = 49^\circ - 50^\circ$ . В обычных радиопульсарах без зарегистрированного рентгеновского и/или гамма-излучения  $\langle\beta_2\rangle = 29^\circ$ .
- Согласно критерию Колмогорова—Смирнова гистограммы распределения  $N(\langle\beta\rangle)$  для трех рассмотренных групп радиопульсаров не различаются с вероятностью более 50%.

Основной вывод можно сформулировать так: проведенный анализ сравнения трех групп радиопульсаров показал, что рассматриваемые группы отличаются, в среднем, по значениям  $(dE/dt)$  и  $V_{lc}$  (см. Тимиркеева, Малов, 2020), но не различаются по углам наклона с учетом дисперсий. Следовательно, структура магнитосфер у трех групп пульсаров не сильно отличается, а их различие обусловлено величиной магнитного поля на световом цилиндре, которое обеспечивает включение механизма жесткого нетеплового излучения у групп X + R и  $\gamma$ + R, но недостаточно для этого у нормальных радиопульсаров.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (РНФ) № 22-12-00236 (<https://rscf.ru/project/22-12-00236/>). Авторы также благодарят М.А. Китаеву и Д.А. Теплых за помощь в подготовке статьи к печати.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Джонстон, Керр (S. Johnston and M. Kerr), MNRAS **474**, 4629 (2018).
2. Манчестер и др. (R.N. Manchester, G.B. Hobbs, A. Teo, and M. Hobbs), Astron. J. **129**, 1993 (2005).
3. Поссенти и др. (A. Possenti, R. Cerutti, M. Colpi, and S. Mereghetti), Astron. Astrophys. **387**, 993 (2002).
4. Принц, Бекер (T. Prinz and W. Becker), preprint (arXiv:1511.07713) (2015).
5. Малов И.Ф., Никитина Е.Б., Астрон. журн. **94**, 598 (2017).
6. Малов, Тимиркеева (I.F. Malov and M.A. Timirkееva), Res. Astron. Astrophys. **18**, 89 (2018).
7. Тимиркеева, Малов (M.A. Timirkееva and I.F. Malov), MNRAS **485**, 5319 (2019).
8. Тимиркеева, Малов (M. Timirkееva and I. Malov), Astrophys. Space Sci. **365**, 190 (2020).

#### ПРИЛОЖЕНИЕ

Данные выборки также представлены в виде электронных таблиц, с которыми можно ознакомиться на сайте Пушинской Радиоастрономической Обсерватории в разделе Online data. Ссылка <https://www.prao.ru/online%20data/onlinedata.html>.