

ПАРАМЕТРЫ РАДИОПУЛЬСАРОВ НА РАЗНЫХ РАССТОЯНИЯХ ОТ “ЛИНИИ СМЕРТИ”

© 2023 г. З. В. Кенько^{1,*}, И. Ф. Малов^{2,**}

¹Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,
Пушкинская радиоастрономическая обсерватория им. В.В. Виткевича,
Астрокосмический центр, Пуццо, Россия

*E-mail: ibick@mail.ru

**E-mail: malov@prao.ru

Поступила в редакцию 18.07.2023 г.

После доработки 17.08.2023 г.

Принята к публикации 28.08.2023 г.

Проведены вычисления углов β между магнитным моментом и осью вращения в радиопульсарах, находящихся на разных расстояниях от “линии смерти”. Показано, что при приближении к “линии смерти” β уменьшается от 36° до 10° . Эти значения соответствуют пульсарам с кинематическим возрастом от 1 до 10 млн. лет. Показано также, что при этом уменьшается их светимость, что свидетельствует о постепенном затухании радиопульсара при увеличении его возраста.

Ключевые слова: нейтронные звезды, радиопульсары, наклоны осей

DOI: 10.31857/S0004629923110075, **EDN:** YGCTWC

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из важнейших параметров, определяющих структуру магнитосферы пульсара, протекающие в ней физические процессы, а иногда и механизмы генерируемого излучения, следует считать угол β между магнитным моментом и осью вращения центральной нейтронной звезды. На начальных этапах исследования пульсаров полагали, что угол β уменьшается экспоненциально с возрастом пульсара (см., напр., [1]). Бескин, Гуревич и Истомин [2] рассмотрели модель токовых потерь, которая предсказывает рост угла β до 90° , т.е. все пульсары должны эволюционировать к ортогональным ротаторам. Однако магнитогидродинамические расчеты [3] показали, что при достаточно разумных предположениях ожидается уменьшение угла β обратно пропорционально квадратному корню из возраста пульсара. Обнаружить изменения угла β с помощью прямых измерений вряд ли возможно, поскольку временные ряды остаются очень короткими. Поэтому необходимо использовать статистические методы анализа с целью ответить на вопрос об изменении этого угла с возрастом пульсара. В работе [4] с помощью одного из таких методов было показано, что наклон магнитного момента к оси вращения с возрастом уменьшается. Независимый способ проверить эволюционный ход угла β

связан с оценкой его значения для пульсаров, находящихся на разном расстоянии от “линии смерти” на диаграмме $\{dP/dt - P\}$. Приближение к ней означает увеличение возраста пульсара. В отличие от статьи [4], в которой использованы индивидуальные оценки для возраста каждого пульсара, мы предлагаем здесь использовать средний возраст объектов в полосах на диаграмме $\{dP/dt - P\}$, отстоящих на разных удалениях от “линии смерти” (см. рис. 1). Такой подход позволяет проанализировать статистическое отличие углов β для пульсаров разного возраста, что может служить проверкой результатов, полученных в [4]. Этой задаче и посвящена настоящая работа.

В качестве “линии смерти” использовалось выражение для модели III' из статьи [5]:

$$\lg(dP/dt) = 2 \lg P - 16.52 + \lg \rho_6, \quad (1)$$

полученное для случая существенно недипольного магнитного поля на поверхности нейтронной звезды. В выражении (1) ρ_6 — радиус кривизны силовой линии магнитного поля, отнесенный к радиусу нейтронной звезды. Мы в дальнейшем положим ρ_6 равным единице. Для анализа использована выборка из 1381 радиопульсара с $0.1 \text{ с} < P < 2 \text{ с}$. Наш выбор обусловлен тем обстоятельством, что замедление вращения во входящих в нее пульсарах может быть описано сов-

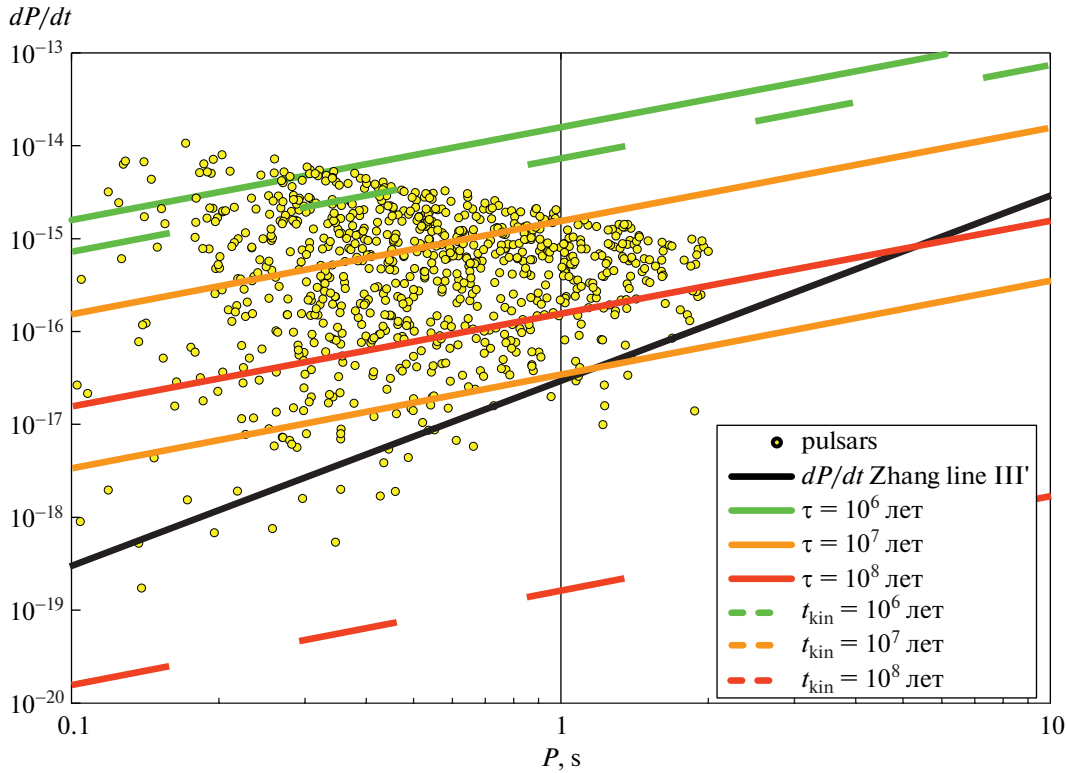


Рис. 1. Положение радиопульсаров, имеющих постоянный возраст от 1 до 100 млн. лет. Соответствующие прямые постоянных возрастов показаны разными цветами.

местным и приблизительно равным вкладом магнитодипольного излучения и пульсарного ветра [6]. Это означает, что можно воспользоваться уравнением:

$$\frac{dE/dt}{2} = \frac{I\Omega d\Omega/dt}{2} = \frac{2B_{eq}R_*^6\Omega^4 \sin^2 \beta}{3c^3}, \quad (2)$$

где B_{eq} — индукция магнитного поля на экваторе нейтронной звезды, $\Omega = 2\pi/P$ — угловая скорость вращения пульсара, E — его энергия вращения, R — радиус нейтронной звезды. Заметная роль магнитодипольного торможения позволяет использовать вычисленные в рамках этого механизма параметры радиопульсаров (в частности, используемый в настоящей работе характеристический возраст) из пополняемого каталога ATNF [7].

В этом каталоге существуют пульсары с более длинными периодами ($P > 2$ с), которые могут характеризоваться другими параметрами и в которых могут работать другие механизмы торможения. Их особенности мы планируем проанализировать в следующей работе.

2. РАСПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛОВ β

Используя методы вычисления углов β , описанные в монографии [8] и использованные в [4], мы провели оценки этих углов для ряда полос на диаграмме $\{dP/dt - P\}$, соответствующих разному постоянному характеристическому возрасту пульсаров,

$$\tau = P/(2dP/dt), \quad (3)$$

($\tau = 10^6, 10^7$ и 10^8 лет) или постоянному кинематическому возрасту t_{kin} :

$$t_{kin} = Z/V, \quad (4)$$

($t_{kin} = 10^6, 10^7$ и 10^8 лет).

В выражении (4) Z — расстояние пульсара от плоскости Галактики, V — составляющая скорости пульсара, перпендикулярная диску Галактики. Линии равного характеристического возраста рассчитывались на основе выражения:

$$\lg \tau (\text{лет}) = \lg P - \lg(dP/dt) - 7.8. \quad (5)$$

Для расчета линий постоянного кинематического возраста использована эмпирическая зависимость между t_{kin} и τ из нашей статьи [4]:

$$\lg t_{kin} = (0.43 \pm 0.06) \lg \tau + (3.28 \pm 0.44). \quad (6)$$

Из ф-лы (6) следует довольно сильное расхождение между t_{kin} и τ , которое становится все больше с увеличением характеристического возраста: при $\tau = 10^6$ лет значение $t_{\text{kin}} = 7.15 \times 10^5$ лет, т.е. $\tau/t_{\text{kin}} = 1.4$; при $\tau = 10^7$ значение $t_{\text{kin}} = 1.92 \times 10^6$ лет, $\tau/t_{\text{kin}} = 5.2$; при $\tau = 10^8$ значение $t_{\text{kin}} = 5.18 \times 10^6$ лет, $\tau/t_{\text{kin}} = 19.3$. Линия $t_{\text{kin}} = 10^8$ лет находится глубоко под “линией смерти”, и таких пульсаров вообще нет. На рис. 2 показаны полученные распределения среднего значения $\langle \beta \rangle$, которые вычислены с использованием трех методов, описанных в [4], для указанных ниже областей:

– Зона $\tau < 10^6$ лет (и соответствующая ей зона $t_{\text{kin}} < 7.15 \times 10^5$ лет), число пульсаров $N = 24$:

$$n_i(\beta) = (4.53 \pm 0.43) \times \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\beta - (35.8^\circ \pm 1.3^\circ)}{11.0^\circ \pm 1.1^\circ}\right)^2\right). \quad (7)$$

Выражение (7) и последующие показывают вписанные в соответствующие распределения гауссианы.

– Полоса $10^6 < \tau < 10^7$ лет (и соответствующая ей полоса $7.15 \times 10^5 < t_{\text{kin}} < 1.92 \times 10^6$ лет), $N = 266$):

$$n_i(\beta) = (50.92 \pm 2.79) \times \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\beta - (27.2^\circ \pm 0.7^\circ)}{10.5^\circ \pm 0.7^\circ}\right)^2\right). \quad (8)$$

– Полоса $10^7 < \tau < 10^8$ лет (и соответствующая ей полоса $1.92 \times 10^6 < t_{\text{kin}} < 5.18 \times 10^6$ лет), $N = 390$:

$$n_i(\beta) = (79.28 \pm 2.11) \times \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\beta - (14.5^\circ \pm 1.1^\circ)}{14.0^\circ \pm 1.0^\circ}\right)^2\right). \quad (9)$$

– Полоса $10^8 < \tau < \text{возраста}$, соответствующего “линии смерти” (и соответствующая ей полоса $5.18 \times 10^6 < t_{\text{kin}} < \text{возраста}$ пульсаров на “линии смерти”), $N = 129$:

$$n_i(\beta) = (58.55 \pm 3.18) \times \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\beta - (9.7^\circ \pm 0.3^\circ)}{3.9^\circ \pm 0.3^\circ}\right)^2\right). \quad (10)$$

– Зона под линией смерти, $N = 26$:

$$n_i(\beta) = (11.69 \pm 0.72) \times \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\beta - (10.2^\circ \pm 0.3^\circ)}{4.0^\circ \pm 0.3^\circ}\right)^2\right). \quad (11)$$

Из приведенных данных следует, что под “линией смерти” (на “кладбище”) наблюдаемое число пульсаров мало. Вообще их наличие в этой области связано, по-видимому, со специфическими параметрами этих объектов. Вполне возможно, что вместо “линии смерти” нужно рассматривать “полосу смерти”. Такой вывод следует, например, из работы [9]. Нужно подчеркнуть, что подавляющее большинство пульсаров расположено выше “линии смерти” и при любом описывающем ее уравнении проведенные нами оценки будут справедливыми.

На рис. 3 показано изменение значений $\langle \beta \rangle$, соответствующих максимумам во вписанных на рис. 2 гауссианах, также показаны дисперсии этих гауссиан.

Эту диаграмму можно также представить в виде зависимости средних значений угла $\langle \beta \rangle$ от среднего возраста пульсаров в выбранной полосе (см. рис. 4). На рис. 4 не показаны значения для пульсаров под “линией смерти”.

Из рис. 2–4 следует, что угол β уменьшается с возрастом пульсара. Максимальная разность между n_{i1}/N_1 (полоса $\langle \tau \rangle = 5 \times 10^5$ лет, $N_1 = 24$) и n_{i4}/N_4 (полоса $\langle \tau \rangle = 8.4 \times 10^8$ лет, $N_4 = 129$) составила $d_{\text{max}} = 0.457$. Квантиль Колмогорова:

$$\lambda = d_{\text{max}} \sqrt{\frac{N_1 N_2}{N_1 + N_2}}, \quad (12)$$

при этом оказывается равным $\lambda = 2.06$. Это означает, что два указанных распределения значимо отличимы с доверительной вероятностью 99.96%.

Линейная аппроксимация зависимости на рис. 4 дает выражение:

$$\lg \langle \beta \rangle = -(0.19 \pm 0.02) \lg \tau [\text{лет}] + (2.63 \pm 0.15), \quad (13)$$

откуда следует

$$\langle \beta \rangle = 30.63^\circ \tau_6^{-0.19}. \quad (14)$$

3. ЗАВИСИМОСТЬ СВЕТИМОСТИ ОТ ВОЗРАСТА ПУЛЬСАРА

С использованием условных светимостей $R_{\text{lum}(400 \text{ МГц})}$ и $R_{\text{lum}14(1400 \text{ МГц})}$ из каталога ATNF и следующих уравнений для их пересчета в физические светимости [10, 11]:

$$\lg L [\text{эрг/с}] = (1.03 \pm 0.03) \times \lg R_{\text{lum}(400)} [\text{МЯн кпк}^2] + (26.46 \pm 0.07), \quad (15)$$

$$\lg L [\text{эрг/с}] = (0.91 \pm 0.55) \times \lg R_{\text{lum}14(1400)} [\text{МЯн кпк}^2] + (27.74 \pm 2.57), \quad (16)$$

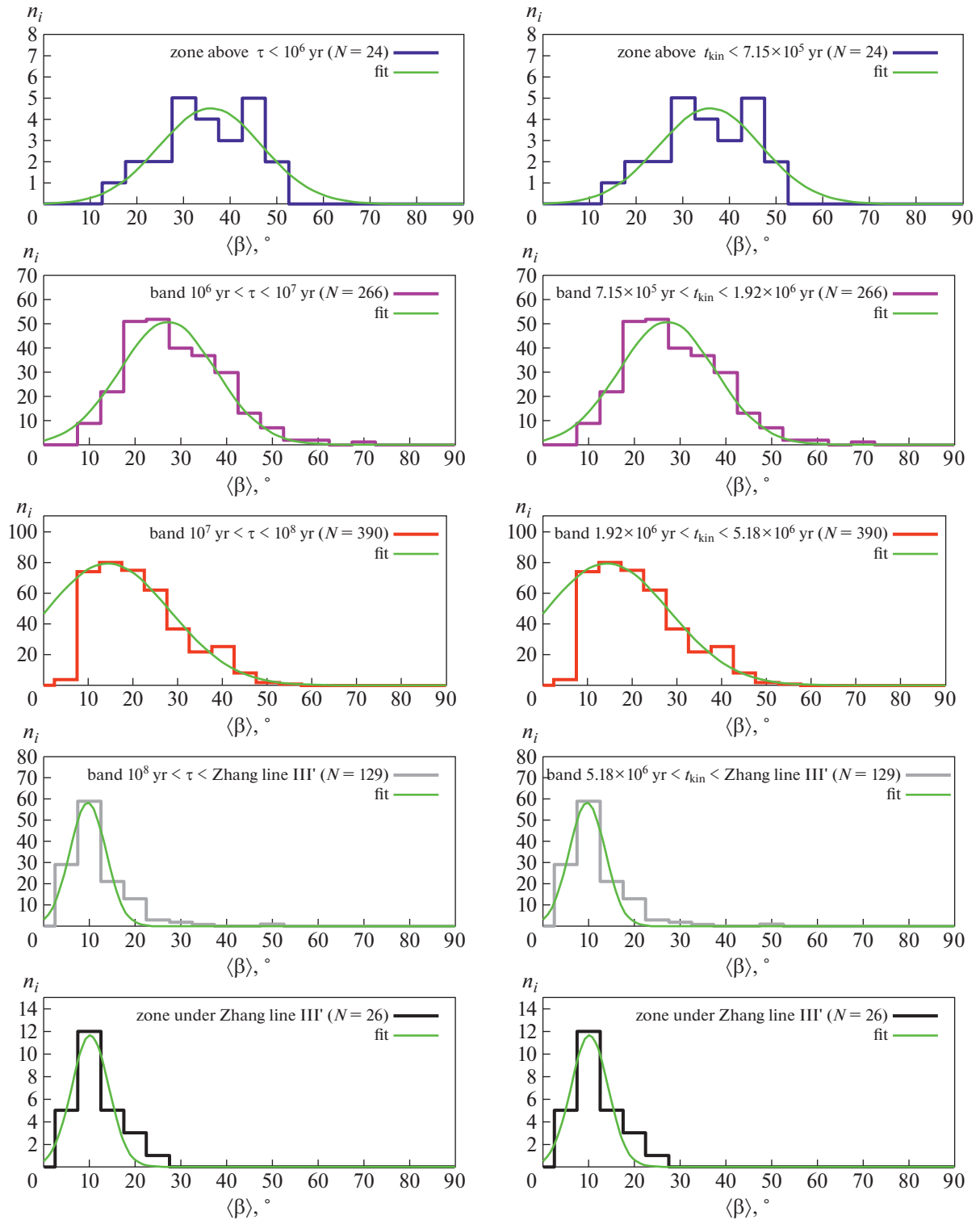


Рис. 2. Распределения средних углов β в соответствующих полосах возраста пульсаров.

были получены выражения для связи L и τ (см. рис. 5):

$$\lg L_{400} = -(0.21 \pm 0.05) \lg \tau + (29.82 \pm 0.34), \quad (17)$$

$$\lg L_{1400} = -(0.18 \pm 0.03) \lg \tau + (29.88 \pm 0.18). \quad (18)$$

На рис. 6 показаны полученные распределения $\langle L_{400} \rangle$ и $\langle L_{1400} \rangle$ для указанных ниже областей.:

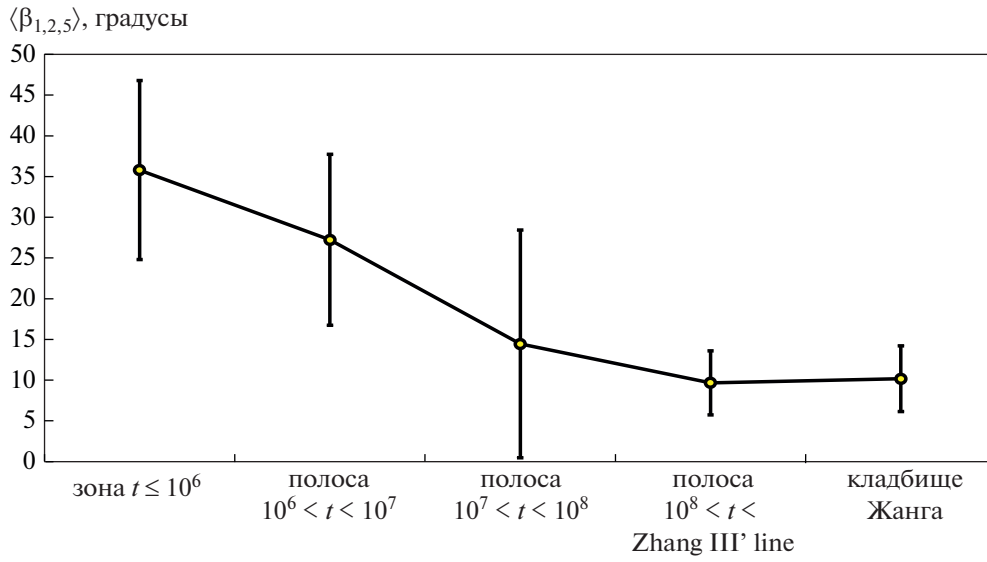


Рис. 3. Изменение значений $\langle \beta \rangle$, соответствующих максимумам во вписанных на рис. 2 гауссианах.

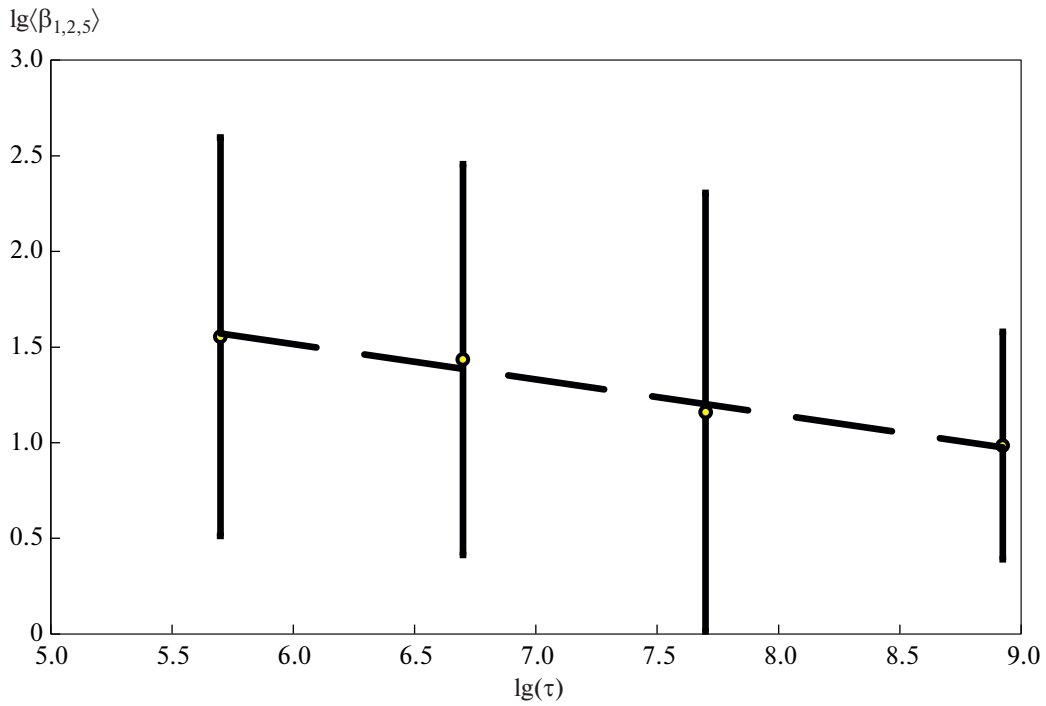


Рис. 4. Зависимость средних значений угла $\langle \beta \rangle$ от среднего возраста пульсаров в выбранной полосе.

– Зона $\tau < 10^6$ лет (и соответствующая ей зона $\langle L_{400} \rangle$, $N = 24$:
 $t_{\text{kin}} < 7.15 \times 10^5$ лет по ф-ле (6)): $\langle L_{400} \rangle$, число пульсаров $N = 8$:

$$n_i(\lg L_{400}) = (1.64 \pm 0.84) \times \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\lg L_{400} - (29.37 \pm 0.69)}{1.07 \pm 0.57} \right)^2\right), \quad (19)$$

$$n_i(\lg L_{400}) = (6.09 \pm 0.80) \times \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\lg L_{400} - (29.12 \pm 0.13)}{0.80 \pm 0.13} \right)^2\right). \quad (20)$$

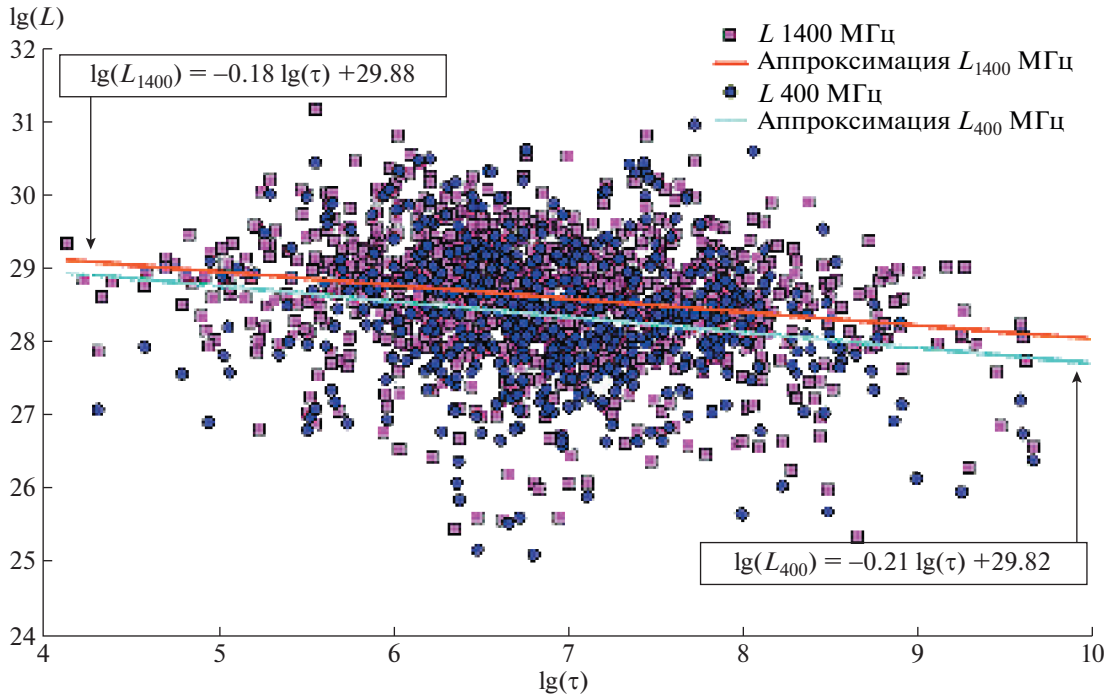


Рис. 5. Распределение зависимости светимости L пульсаров от характеристического возраста τ .

– Полоса $10^6 < \tau < 10^7$ лет (и соответствующая ей полоса $7.15 \times 10^5 < t_{\text{kin}} < 1.92 \times 10^6$ лет): $\langle L_{400} \rangle$, $N = 122$:

$$n_i(\lg L_{400}) = (26.97 \pm 1.33) \times \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\lg L_{400} - (28.82 \pm 0.05)}{0.88 \pm 0.05} \right)^2\right), \quad (21)$$

$\langle L_{1400} \rangle$, $N = 243$:

$$n_i(\lg L_{1400}) = (61.62 \pm 2.84) \times \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\lg L_{1400} - (29.06 \pm 0.04)}{0.77 \pm 0.04} \right)^2\right). \quad (22)$$

– Полоса $10^7 < \tau < 10^8$ лет (и соответствующая ей полоса $1.92 \times 10^6 < t_{\text{kin}} < 5.18 \times 10^6$ лет): $\langle L_{400} \rangle$, $N = 179$:

$$n_i(\lg L_{400}) = (46.65 \pm 1.61) \times \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\lg L_{400} - (28.56 \pm 0.03)}{0.74 \pm 0.03} \right)^2\right), \quad (23)$$

$\langle L_{1400} \rangle$, $N = 285$:

$$n_i(\lg L_{1400}) = (78.73 \pm 1.94) \times \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\lg L_{1400} - (28.85 \pm 0.02)}{0.70 \pm 0.02} \right)^2\right). \quad (24)$$

– Полоса $10^8 < \tau$ выше “линии смерти” (и соответствующая ей полоса $5.18 \times 10^6 < t_{\text{kin}}$ над “линией смерти”): $\langle L_{400} \rangle$, $N = 44$:

$$n_i(\lg L_{400}) = (11.95 \pm 0.83) \times \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\lg L_{400} - (28.34 \pm 0.06)}{0.69 \pm 0.06} \right)^2\right), \quad (25)$$

$\langle L_{1400} \rangle$, $N = 98$:

$$n_i(\lg L_{1400}) = (27.92 \pm 1.70) \times \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\lg L_{1400} - (28.68 \pm 0.05)}{0.66 \pm 0.05} \right)^2\right). \quad (26)$$

– Зона под “линией смерти”: $\langle L_{400} \rangle$, $N = 5$:

$$n_i(\lg L_{400}) = (1.78 \pm 0.18) \times \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\lg L_{400} - (26.88 \pm 0.07)}{0.57 \pm 0.07} \right)^2\right), \quad (27)$$

$\langle L_{1400} \rangle$, $N = 19$:

$$n_i(\lg L_{1400}) = (5.23 \pm 1.16) \times \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\lg L_{1400} - (28.37 \pm 0.14)}{0.66 \pm 0.23} \right)^2\right). \quad (28)$$

Здесь следует заметить, что можно было бы воспользоваться одной из эмпирических зависимостей (15) или (16) для вычисления L . Мы, однако, приводим распределения на основе обоих урав-

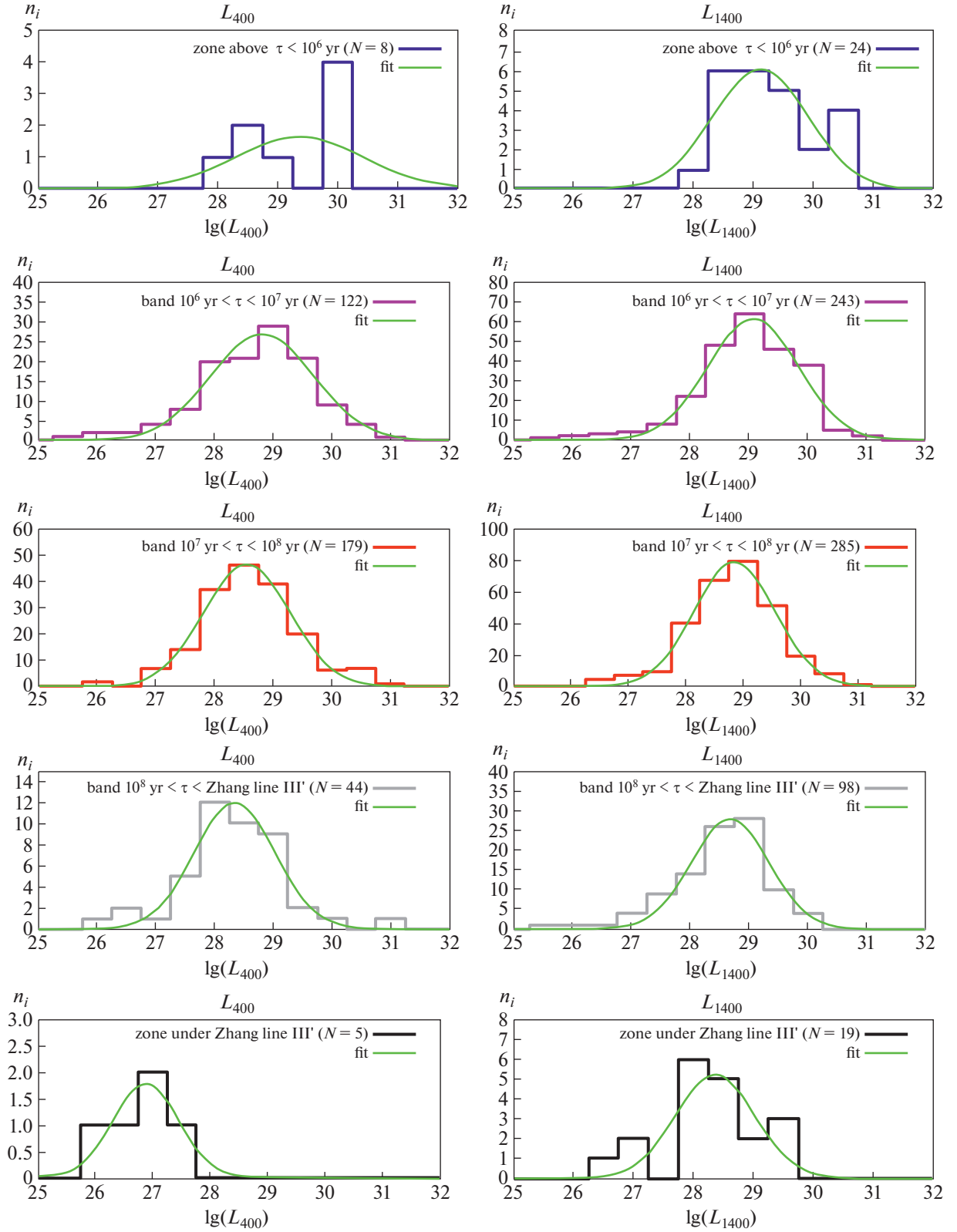


Рис. 6. Полученные распределения $\langle L_{400} \rangle$ и $\langle L_{1400} \rangle$ для рассматриваемых областей на диаграмме $\{dP/dt - P\}$.

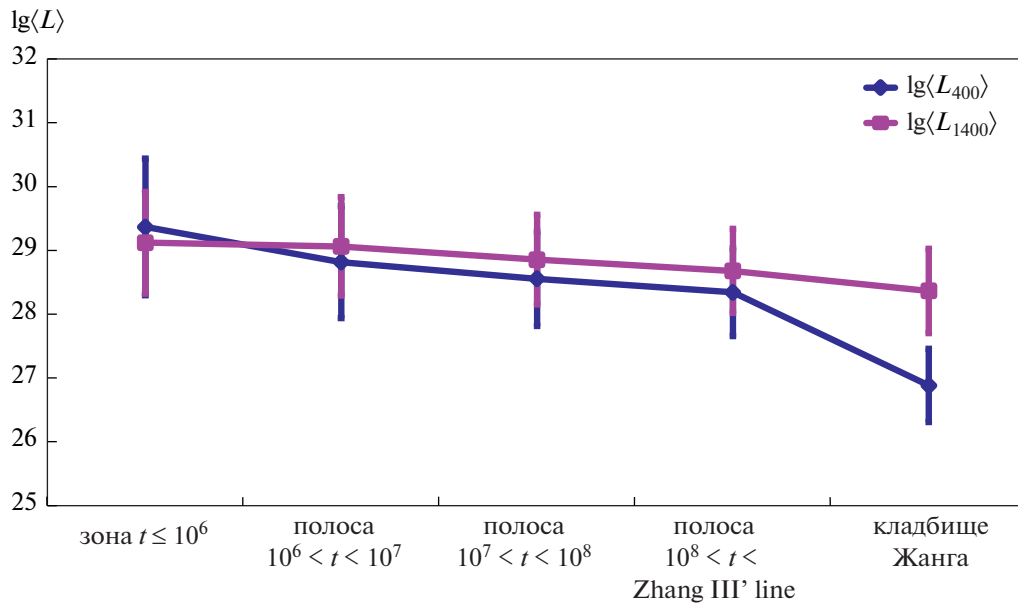


Рис. 7. Средние значения $\langle L_{400} \rangle$ и $\langle L_{1400} \rangle$ и их дисперсии в различных полосах на диаграмме $\{dP/dt - P\}$.

нений, поскольку в каталоге ATNF значения R_{lum} и R_{lum14} даны для разного количества пульсаров, и полученные по ним распределения L несколько отличаются. Для понимания, на основе каких значений R_{lum} вычислялись светимости, мы обозначили их как L_{400} и L_{1400} .

На рис. 7 и в табл. 1 показаны средние значения $\langle L_{400} \rangle$ и $\langle L_{1400} \rangle$ и их дисперсии в различных полосах.

На рис. 8 представлены зависимости светимости от возраста для пульсаров над “линией смерти”. Прямые на этом рисунке описываются следующими уравнениями. Для L_{400} :

$$\lg L_{400} = -(0.31 \pm 0.06) \lg \tau [\text{лет}] + (31.00 \pm 0.50) \quad (29)$$

(коэффициент корреляции $K = 0.96$), откуда следует:

$$L_{400} = 10^{31} \tau^{-0.31}. \quad (30)$$

И для L_{1400} :

$$\lg L_{1400} = -(0.14 \pm 0.02) \lg \tau [\text{лет}] + (30.00 \pm 0.10) \quad (31)$$

(коэффициент корреляции $K = 0.98$), откуда следует:

$$L_{400} = 10^{30} \tau^{-0.14}. \quad (32)$$

Различию светимостей для двух полос с $\tau < 10^6$ лет и $\tau \sim 10^8$ лет соответствует квантиль $\lambda = 1.24$ и вероятность их различия 90.76%.

4. ДИСКУССИЯ. ВЫВОДЫ

Проведенный анализ показал, что изменение угла β между магнитным моментом и осью вращения пульсара происходит за время порядка миллионов лет. Поэтому трудно ожидать обнаружение такого изменения за несколько десятков лет, прошедших с момента обнаружения первого пульсара. Для решения задачи об эволюции этого угла приходится обращаться к статистическим методам. Один из них использован в представленной работе и основан он на сравнении угла β для пульсаров на диаграмме $\{dP/dt - P\}$ с разным возрастом.

В результате показано, что этот угол уменьшается от 35.8° до 9.7° в максимуме полученных рас-

Таблица 1. Средние значения распределений $\lg \langle L_{400} \rangle$ и $\lg \langle L_{1400} \rangle$ в разных зонах характеристического (τ) и кинематического (t_{kin}) возрастов пульсаров

τ , годы	t_{kin} , годы	Среднее значение $\lg \langle L_{400} \rangle$	σ_{L400}	Среднее значение $\lg \langle L_{1400} \rangle$	σ_{L1400}
5×10^5	5.31×10^5	29.37	1.07	29.12	0.80
5×10^6	1.43×10^6	28.82	0.88	29.06	0.77
5×10^7	3.84×10^6	28.56	0.74	28.85	0.70
8.4×10^8	1.29×10^7	28.34	0.69	28.68	0.66
Под линией смерти		26.88	0.57	28.37	0.66

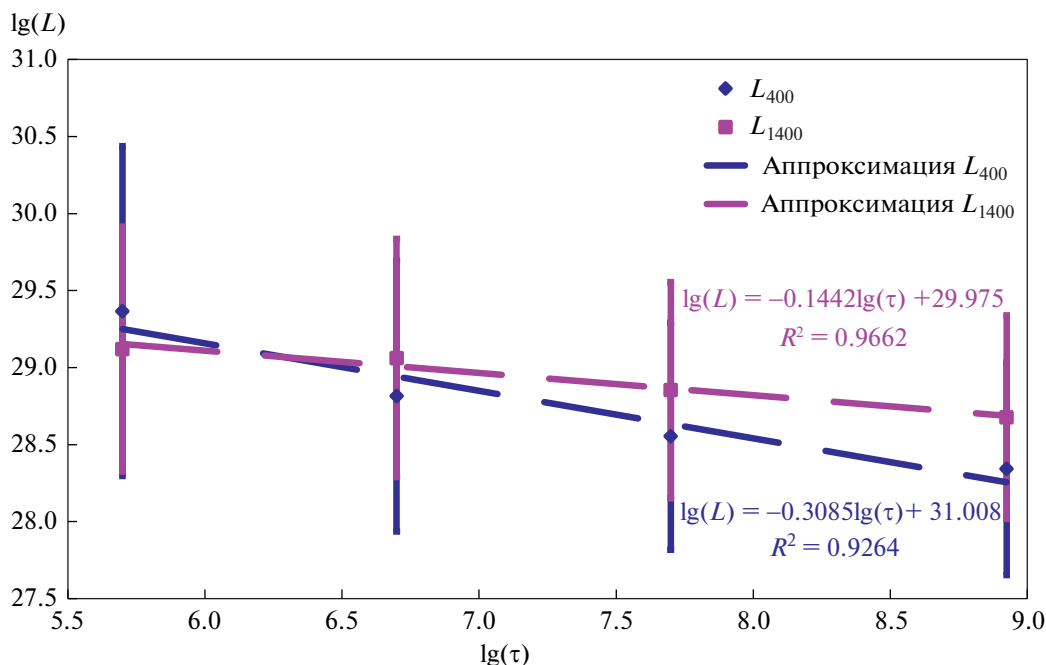


Рис. 8. Зависимости светимости L от характеристического возраста τ для пульсаров над линией смерти.

пределений при приближении к “линии смерти” или при увеличении кинематического возраста пульсара от 1 миллиона до десятков миллионов лет. Таким образом, радиопульсары с большим возрастом представляют собой ротаторы, близкие к соосным, в то время как около 70% объектов с возрастом от миллиона до нескольких миллионов лет обладают углами от 20° до 50° .

Проведенный анализ подтверждает сделанный в [4] вывод об уменьшении угла β с возрастом пульсара.

Предположение об уменьшении угла наклона конуса излучения к оси вращения пульсара при приближении к “линии смерти” было сделано в работе [12] на основе оценок относительного углового размера этого конуса ($W_{50}/P^{0.5}$). Мы здесь использовали прямые вычисления угла β для пульсаров на разных расстояниях от линии смерти.

Широкие распределения углов для пульсаров с разными возрастами может свидетельствовать о том, что при взрыве сверхновых пульсары рождаются с произвольными наклонами магнитного момента к оси вращения нейтронной звезды. Такой вывод был действительно сделан в работе [10] при анализе параметров пульсаров, находящихся в настоящее время в остатках сверхновых, т.е. на ранних стадиях своей эволюции.

При приближении к “линии смерти” наблюдается также уменьшение на порядок светимости пульсаров (от 2.34×10^{29} до 2.19×10^{28} эрг/с в максимумах исследованных распределений).

Для пульсаров же под “линией смерти” $\langle L \rangle = 7.59 \times 10^{26}$ эрг/с. Следовательно, действительно на пути к “линии смерти” пульсар затухает.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают признательность Л.Б. Потановой за большую помощь в подготовке статьи к печати.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *L. Davis and M. Goldstein*, *Astrophys. J.* **59**, L81 (1970).
2. *В. С. Бескин, А. В. Гуревич, Я. Н. Истомин*, *ЖЭТФ* **85**(2), 401 (1983).
3. *A. Philippov, A. Tchekhovskoy, and J. G. Li*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **441**, 1879 (2014).
4. *Z. V. Ken'ko and I. F. Malov*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **522**, 1826, (2023).
5. *B. Zhang, A. K. Harding, and A. G. Muslimov*, *Astrophys. J.* **531**, L135 (2000).
6. *И. Ф. Малов, А. П. Морозова*, *Астрон. журн.* **99**(1), 29 (2022).
7. *R. N. Manchester, G. B. Hobbs, A. Teoh, and M. Hobbs*, *Astron. J.* **129**, 1993 (2005).
8. *И. Ф. Малов*, *Радиопульсары* (М.: Наука, 2004).
9. *V. S. Beskin and A. Yu. Istomin*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **516**(4), 5084 (2022), arXiv:2207.04723 [astro-ph.HE].
10. *I. F. Malov*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **502**, 809 (2021).
11. *И. Ф. Малов, О. И. Малов*, *Астрон. журн.* **83**(6), 542 (2006).
12. *I. Contopoulos and A. Spitkovsky*, *Astrophys. J.* **643**, 1139 (2006).

PARAMETERS OF RADIO PULSARS AT DIFFERENT DISTANCES FROM THE “DEATH LINE”

Z. V. Ken’ko^a and I. F. Malov^b

^aBelarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

*^bLebedev Physical Institute of the RAS, Pushchino Radioastronomical Observatory,
Astrospace Center, Pushchino, Russia*

Calculations of angles β between magnetic moments and rotation axes have been carried out for radio pulsars located at different distances from the “death line”. It is shown that these angles decrease from 36° to 10° when pulsars move to the “death line”. Such values correspond to kinematic ages from 1 to 10 millions of years. It is detected also that for these ages radio luminosities of pulsars decrease. This means that radio pulsars fade out when their age increases.

Keywords: neutron stars, radio pulsars, angles between axes