

Распределение пульсаров в Галактике

Измеренные расстояния позволяют обратиться к задаче распределения пульсаров в Галактике. Соответствующая функция распределения зависит от трёх переменных: расстояния от Центра Галактики R , высоты над плоскостью Галактики (z -координаты) и светимости L . Обычно считается, что три функции $r(z)$, $f(R)$ и $\Phi(L)$ независимы, и общая функция распределения представляет собой их произведение.

Мы не будем здесь подробно описывать процедуру получения функций распределения и учёта искажений эффектами селекции, а приведём лишь конечные результаты их анализа. Оказалось, что число пульсаров уменьшается экспоненциально с ростом z при характерном масштабе высоты порядка 400 пк [15]. В то же время для массивных звёзд, из которых, как считается, образуются пульсары, характерна высота менее 100 пк. Единственным объяснением такого различия может быть наличие у пульсаров большой составляющей скорости, перпендикулярной плоскости Галактики. Действительно, в работах [26–27] показано, что по измерению собственных движений пульсаров их скорости направлены от плоскости и имеют квазимаквелловское распределение с дисперсией z -компоненты ~ 100 км/с. Знание z -координаты и принятие в качестве среднего значения скорости порядка 100 км/с позволяет оценить кинематический возраст пульсара, который в среднем оказывается равным ~ 10 млн лет.

Функция распределения пульсаров по галактоцентрическим расстояниям $f(R)$ показывает наличие максимума в районе $R \sim 4+6$ кпк и падение в направлении Антицентра [15]. Наблюдаемое распределение пульсаров по R аналогично распределению сверхновых [28], остатков сверхновых [29] и молекулярных облаков [30], что усиливает вывод о связи пульсаров со сверхновыми и их прародителями из населения I.

Распределение по светимостям рассматривается в следующем разделе, посвящённом в основном наблюдаемым спектрам радиоизлучения пульсаров.

2. СПЕКТРЫ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ. СВЕТИМОСТЬ

Важнейшую информацию о природе любого источника и, в частности, о механизме его излучения содержит наблюдаемый энергетический спектр, т.е. распределение излучаемой энергии по частотам. Что касается радиопульсаров, то лишь у 41 из более 1300 объектов, вошедших в известные каталоги, обнаружено

излучение вне радиодиапазона [31]. Основное содержание этой главы будет посвящено спектрам радиоизлучения пульсаров. Соответствующий диапазон частот, в котором проводились наблюдения, простирается от 16,7 МГц до 80 ГГц, т.е. более чем на 10 октав. Измерения в таком широком диапазоне привели к накоплению большого наблюдательного материала и позволили сделать целый ряд важных выводов о спектрах и светимостях пульсаров.

ПОСТРОЕНИЕ СРЕДНИХ СПЕКТРОВ

Радиопульсары отличаются от многих других космических радиоисточников своей ярко выраженной нестационарностью. Уже в работе Хьюиша с соавторами [1], где сообщалось об открытии пульсаров, отмечалось также нерегулярное изменение интенсивности наблюдавшихся импульсов. В дальнейшем детальные исследования показали, что радиоизлучение всех пульсаров подвержено значительным вариациям в широком временном интервале от 10^{-6} до 10^7 с [32–37]. Как было установлено в результате анализа этих вариаций, характерные времена от нескольких минут до нескольких часов могут быть связаны с мерцаниями на неоднородностях межзвёздной плазмы [38]. В то же время существуют флуктуации интенсивности импульсного излучения с временами от микросекунды до нескольких месяцев, вызванные, по-видимому, процессами в магнитосферах пульсаров. Такой характер излучения означает, что для его описания необходимо получить и исследовать мгновенные спектры, т.е. одновременно измерить плотность потока (или энергию в импульсе) в указанном выше диапазоне частот. Для решения этой задачи необходимо наличие радиометров с высокой мгновенной чувствительностью, настроенных на частоты всего спектра и расположенных пространственно достаточно близко, чтобы данный пульсар был доступен одновременным наблюдениям во всех пунктах. Многократно проведённые наблюдения подобного типа дали бы также возможность исследовать эволюцию спектров во времени. Однако состояние современной радиоастрономической техники не позволяет полностью решить эту задачу. Наибольшим продвижением в данном направлении следует считать исследования мгновенных спектров девяти пульсаров, проведённые по специальной программе на трёх обсерваториях: в Институте радиоэлектроники АН Украины⁴ (Харьков) (частоты 16,7 (20) и

⁴ Современное название – Институт радиоастрономии АН Украины.

25 МГц), на Радиоастрономической станции⁵ Физического института им. П.Н. Лебедева РАН (Пушино) (частоты 61 и 102 (110) МГц) и в Наффилдских радиоастрономических лабораториях (Джодрелл Бэнк, Англия) (частоты 151, 408 и 1420 МГц) [39, 40]. Оказалось, что для мгновенных спектров характерны значительные вариации ото дня ко дню [39]. Неточность определения истинных потоков из-за влияния мерцаний мала на частотах $17\div 151$ МГц и сильно искажает результаты измерений в диапазоне $408\div 1420$ МГц. Это обстоятельство связано с быстрым уменьшением радиуса частотной корреляции при увеличении длины волны ($\propto \lambda^{-4}$) [41], который в метровом диапазоне для большей части пульсаров становится значительно меньше полосы радиометров. Тем не менее, и на низких частотах мгновенные спектры показывают сильные вариации от сеанса к сеансу, причём могут наблюдаться не только изменения величины спектрального индекса, но даже и его знака.

Как по индивидуальным импульсам получают средние профили, так и по мгновенным спектрам, усреднив их по всем сеансам наблюдений, можно получить средние спектры.

При этом ослабляется влияние как собственных вариаций потока, так и влияние мерцаний. Таким способом были получены средние спектры пульсаров PSR B0329+54, 0628–28, 0809+74, 0950+08, 1133+16, 1237+25, 1508+55, 1642–03 и 1919+21. Сравнение этих данных с результатами других авторов показало [42], что несмотря на присущее радиоизлучению пульсаров значительное изменение спектров от сеанса к сеансу каждый пульсар имеет устойчивую во времени среднюю форму спектра. Кроме того анализ спектров выявил наличие низкочастотного завала (впервые отмеченного Робинзоном [43], а затем рассмотренного Зибером [44]) и корреляции наклонов в спектре слева и справа от частоты максимума [42].

Устойчивость среднего спектра позволяет рассматривать его как ещё одну (наряду со средним профилем и параметрами поляризации) важнейшую характеристику данного пульсара. Выше уже отмечалось, что построение мгновенных спектров представляет собой очень сложную наблюдательную задачу, однако факт устойчивости среднего спектра позволяет использовать для его получения и неодновременные наблюдения, т.е. можно построить компиляционный спектр, который, как следует из современных представлений, не отличается от среднего (различны

⁵ В настоящее время – Пушинская радиоастрономическая обсерватория.

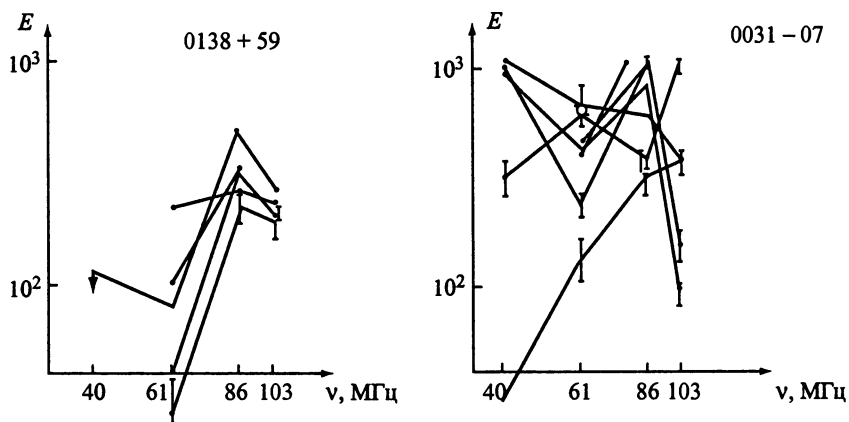


Рис. 9. Примеры пульсаров со стабильными и с сильно изменяющимися мгновенными спектрами [39]

только методы их построения). Поэтому в дальнейшем мы не будем делать различия между ними.

Прежде чем перейти к описанию компиляционных спектров, остановимся кратко на вопросе о тех временах, которые достаточны для получения устойчивого среднего спектра. Сразу следует отметить, что в настоящее время исчерпывающих исследований по указанной проблеме не существует, и это одна из важнейших наблюдательных задач, которую ещё предстоит решить. Наиболее полные данные приведены в [42], где показано, что вариации мгновенных спектров в метровом диапазоне волн ($39 \div 102$ МГц) присущи всем исследовавшимся пульсарам, при этом примерно у половины пульсаров форма спектра сохраняется, а у другой половины заметно изменяется. Обнаружена корреляция степени вариаций с частотой максимума ν_m и шириной спектра. У пульсаров с $\nu_m = 40 \div 102$ МГц вариация формы сильнее, чем у объектов с $\nu_m \geq 150$ МГц. Пульсары с более размытым максимумом (например, PSR B1133+16) показывают меньшие вариации формы. На рис. 9 приведены характерные примеры двух различных изменений формы спектра (стабильная форма у PSR B0138+59 и сильно изменяющаяся у PSR B0031-07). Для целого ряда пульсаров обнаружены изменения в спектре в широком временном интервале от нескольких минут до нескольких месяцев (а может быть, и до нескольких лет). Такие изменения нельзя объяснить ошибками измерений, они связаны с особенностями механизма излучения пульсаров. Проведённые исследования показали, что, если для получения среднего профиля

достаточно накопления около 1000 импульсов, то при построении среднего спектра такое время накопления можно использовать лишь для устранения минутных вариаций. Для сглаживания долговременных изменений и выявления возможного векового хода необходимы многократные наблюдения в течение длительных промежутков времени. Поэтому для построения компиляционного спектра в идеальном варианте должны быть проведены серии измерений с промежутками между ними от минут до лет. Для большей части пульсаров такую программу ещё предстоит осуществить.

АНАЛИЗ СРЕДНИХ СПЕКТРОВ

Имеющиеся наблюдательные данные позволили получить средние спектры 340 нормальных [45] и 38 миллисекундных пульсаров [46–47]. При их построении проводилось усреднение энергий в импульсе (с учётом веса, определявшегося ошибками измерений), полученных разными авторами в разное время на близких частотах (близкими считались частоты, для которых $\lg(v_1/v_2) < 0,08$).

Сопоставление средних спектров выявило в них три характерные особенности (рис. 10) [48]: 1) наличие участка со степенной зависимостью $E_\nu \propto \nu^{-\alpha}$, 2) плавное изменение величины и знака спектрального индекса в низкочастотной области (низкочастотный завал), 3) достаточно резкое увеличение наклона спектра на высоких частотах (высокочастотный излом).

Степенной участок спектра обнаружен у большей части пульсаров. Он расположен, как правило, в дециметровом и сантиметровом диапазонах волн. Не исключена возможность, что у нескольких пульсаров спектральный индекс α изменяется с частотой (нельзя уверенно выделить участок с постоянным α). Примером может служить пульсар PSR B1822-09. С учётом сказанного выше о вариациях интенсивности излучения пульсаров для подтверждения такого вывода необходимы новые, более детальные исследования.

У четырёх пульсаров обнаружено уплощение, а возможно и подъём в высокочастотной области ($\nu > 30$ ГГц) [49].

Значения спектрального индекса для исследованных пульсаров [50] заключены в диапазоне от $-0,2$ до $3,8$ при средней величине $\langle \alpha \rangle = 1,7 \pm 0,6$.

Как показал анализ спектров, низкочастотный завал наблюдается в 114 пульсарах, у которых проведены измерения в мет-

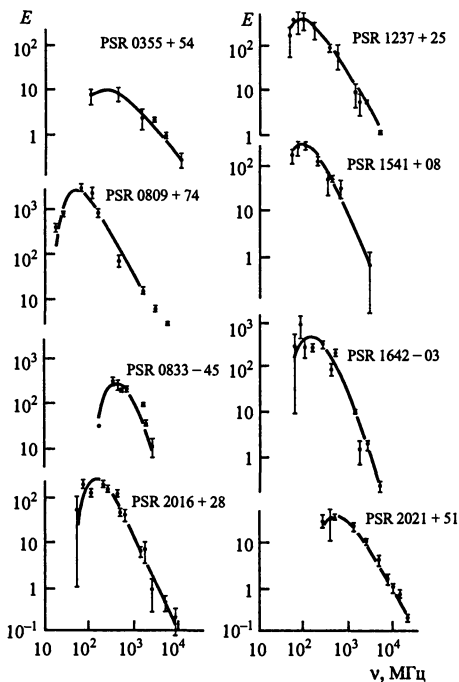


Рис. 10. Примеры типичных спектров пульсаров [48]

Как и в случае частоты максимума, наблюдается зависимость $\nu_c(P)$:

$$\nu_c (\text{ГГц}) = 1,4 P(c)^{-0,46 \pm 0,18}. \quad (6)$$

В 32 пульсарах одновременно измерены или оценены значения ν_m и ν_c [50]. Оказалось, что эти два параметра коррелируют друг с другом [50, 51]. В настоящее время связь этих величин может быть представлена в виде

$$\nu_m (\text{ГГц}) = 0,1 \nu_c (\text{ГГц}). \quad (7)$$

Наконец, следует отметить, что упомянутая в работе [40] корреляция между наклонами в спектре слева и справа от максимума подтверждается по новым данным.

Совокупность наблюдательных результатов приводит к выводу о том, что спектр радиоизлучения пульсара смещается в сторону длинных волн и становится более узким при увеличении периода вращения нейтронной звезды P . Действительно, как следует из соотношений (5) и (6), при значении периода $P = 2$ с спектр заключён между частотами $\nu_m = 78$ МГц и $\nu_c = 1018$ МГц,

в этом диапазоне. Значения частоты максимума заключены между 50 и 300 МГц при средней величине порядка 100 МГц.

Обнаруженная в работе [51] для 17 пульсаров зависимость между ν_m и P подтверждается и по данным для 114 пульсаров [50]:

$$\begin{aligned} \nu_m (\text{МГц}) &= \\ &= 120 P(c)^{-0,36 \pm 0,09}. \quad (5) \end{aligned}$$

Что касается высоко-частотного излома, то как характерная особенность спектра он был впервые упомянут в работе [51], а в настоящее время обнаружен у 46 пульсаров [50]. Соответствующие значения ν_c заключены в пределах от 0,4 до 10 ГГц при средней величине порядка 2 ГГц.

и его ширина равна $\Delta\nu = 0,94$ ГГц. Для $P = 0,2$ с $\nu_m = 214$ МГц, $\nu_c = 2935$ МГц, $\Delta\nu = 2,7$ ГГц.

Приведённые зависимости, как мы увидим в дальнейшем, очень важны при проверке справедливости той или иной модели пульсара.

РАДИОСВЕТИМОСТИ ПУЛЬСАРОВ

Одна из важнейших энергетических характеристик пульсара – его радиосветимость может быть определена с помощью соотношения, справедливого для источника малых угловых размеров:

$$L = \iint S_\nu d\nu dA, \quad (8)$$

где S_ν – поток радиоизлучения на частоте ν , A – площадь излучающей поверхности. В модели полярной шапки (см. гл. II) можно считать, что излучает круговая область с угловым радиусом $\theta_p/2$.

В этом случае для пульсара, расположенного на расстоянии d от наблюдателя и имеющего ширину импульса W (с),

$$A = \pi^3 d^2 (W/P)^2. \quad (9)$$

Средний по времени поток в импульсе связан с энергией, заключённой в этом импульсе, соотношением

$$S_\nu = E_\nu/W_\nu, \quad (10)$$

и наблюдаемая светимость оказывается равной

$$L = \frac{\pi^3 d^2}{P^2} \int_0^\infty E_\nu W_\nu d\nu. \quad (11)$$

При записи выражения (11) предполагалось, что диаграмма излучения, соответствующая среднему импульсу, является круговой и что вне среднего импульса излучение отсутствует. В силу целого ряда причин диаграмма может быть вытянута или в меридиональном или в экваториальном направлении [52, 53], однако в настоящее время общепринятой точки зрения по данному вопросу не существует. Что касается межимпульсного излучения, то у ряда пульсаров оно действительно обнаружено [54, 55], но его вклад в полную светимость невелик.

Для статистических исследований иногда (см., например, [38]) используется в качестве самой грубой оценки величина, пропорциональная монохроматической светимости

$$L_1 = S_{400} d^2, \quad (12)$$

где S_{400} – поток на частоте 400 МГц. Ближе к реальному значению светимости оценка, приведённая в работе [56]:

$$L_2 = \pi^3 d^2 W_{50} S_{400} \Delta\nu / P. \quad (13)$$

Здесь предполагается, что ширина импульса по половинной интенсивности W_{50} для данного пульсара не зависит от частоты и что спектры всех пульсаров могут быть представлены в виде прямоугольника с высотой S_{400} и с постоянной шириной $\Delta\nu$, которая в [56] полагалась равной 400 МГц.

Для вычисления светимости по формуле (11) необходимо знать спектр излучения во всём диапазоне частот и зависимость ширины импульса от частоты. При всех оценках на основе наблюдательных данных в этом случае получается величина, которая представляет собой нижний предел реальной светимости пульсара. Во-первых, как уже отмечалось, удаётся измерить поток излучения только в ограниченном интервале частот. Во-вторых, луч зрения наблюдателя не проходит, как правило, через центр конуса излучения, и наблюдаемая ширина профиля меньше, чем ширина конуса. Наконец, если сечение конуса вытянуто в меридиональном направлении, то площадь этого сечения будет больше, чем вычисленная из выражения (9) величина A .

Что касается зависимости ширины импульса от частоты, то в диапазоне, на который приходится основная часть излучения (между частотами ν_m и ν_c), эта ширина, как правило, изменяется не слишком сильно, особенно на частотах выше 400 МГц [57], и такой зависимостью можно пренебречь (ошибка в оценке светимости при этом не превышает обычно 10 %).

Измеренные спектры пульсаров дали возможность вычислить значения радиосветимости L_r для 311 нормальных и 27 короткопериодических (быстрых) пульсаров с $P < 0,1$ с (табл. 1, 2).

Типичный вид радиоспектра представлен на рис. 11. Вписывание модельной кривой предполагает хорошее знание параметров магнитосферы, отсутствующее до сих пор. Поэтому при вычислении светимости считалось, что спектр может быть представлен тремя или двумя линейными участками: низкочастотной частью до частоты максимума ν_m со спектральным индексом $-\alpha_1$, основным интервалом между ν_m и ν_c (спектральный индекс

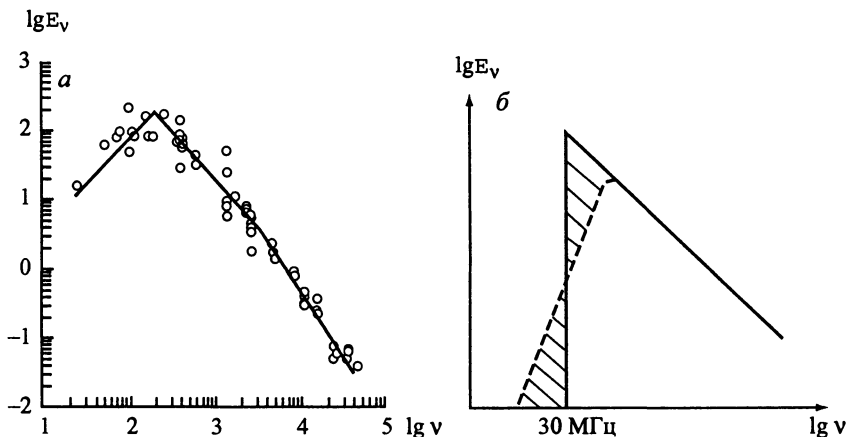


Рис. 11. Типичный компиляционный спектр пульсара PSR B1929+10 (а) и модельный спектр быстрого пульсара (б)

α_2) и высокочастотной частью за изломом (для пульсаров, у которых он обнаружен) с наклоном, определяемым значением α_3 .

В тех случаях, когда отсутствовала одна из частей спектра, для её аппроксимации использовались статистические зависимости

$$\alpha_1 = -0,21\alpha_2 - 1,01, \quad (14)$$

$$\lg \alpha_3 = 0,9 \lg \alpha_2 + 0,26, \quad (15)$$

$$\lg \nu_m (\text{МГц}) = 1,95 - 0,58 \lg P (\text{с}), \quad (16)$$

$$\lg \nu_c (\text{ГГц}) = 0,35 - 0,52 \lg P (\text{с}). \quad (17)$$

Значения α_2 , α_3 , ν_m и ν_c для пульсаров использованной выборки приведены в работах [48, 58–60].

Вычисление светимости сводилось к вычислению трёх интегралов $I = \int_{\nu_2}^{\nu_1} E_\nu d\nu$, которые могут быть представлены в виде

$$I = \begin{cases} \frac{E_\nu^0 \nu_0^\alpha}{1 - \alpha} (\nu_2^{1-\alpha} - \nu_1^{1-\alpha}) & \alpha \neq 1, \\ E_\nu^0 \nu_0^\alpha \lg(\nu_2 / \nu_1) & \alpha = 1. \end{cases} \quad (18)$$

Здесь E_ν^0 – значение энергии в импульсе на частоте ν_0 .

Как правило, основной вклад в светимость даёт центральный линейный участок, а вклады низкочастотной и высокочастотной

Таблица 1
Радиосветимости 311 нормальных пульсаров

<i>N</i>	PSR	<i>P</i>	$\lg L_r$
1	J0014 + 4746	1,240699038946	28,25
2	J0034 – 0721	0,9429509945598	28,31
3	J0040 + 5716	1,1182253452412	28,20
4	J0048 + 3412	1,217094296058	28,54
5	J0055 + 5117	2,115171148865	27,87
6	J0056 + 4756	0,472036662076	26,96
7	J0102 + 6537	1,679164229064	28,46
8	J0108 + 6608	1,2836598429	27,62
9	J0117 + 5914	0,1014390664824	27,66
10	J0139 + 5814	0,272450630950	28,78
11	J0141 + 6009	1,2229485205457	28,88
12	J0147 + 5922	0,1963212793124	27,88
13	J0151 – 0635	1,464664549334	28,37
14	J0152 – 1637	0,8327416126878	27,75
15	J0157 + 6212	2,35174493646	27,99
16	J0206 – 4028	0,630550140847	26,95
17	J0231 + 7026	1,466820306152	27,40
18	J0255 – 5304	0,447708444058	27,95
19	J0304 + 1932	1,387584446262	27,67
20	J0323 + 3944	3,032071956385	27,82
21	J0332 + 5434	0,7145196822210	29,63
22	J0335 + 4555	0,26920054092953	27,48
23	J0343 + 5312	1,934478067294	27,95
24	J0357 + 5236	0,1970300980314	29,18
25	J0358 + 5413	0,1563824177774	29,57
26	J0401 – 7608	0,545252742352	28,03
27	J0406 + 6138	0,594574283247	28,58
28	J0415 + 6954	0,3907150899386	27,29
29	J0421 – 0345	2,161308494552	28,09
30	J0450 – 1248	0,4380141493906	28,52
31	J0452 – 1759	0,548939223294	29,31
32	J0454 + 5543	0,340729436235	27,72
33	J0459 – 0210	1,133076123659	27,33
34	J0502 + 4654	0,638565481517	27,96
35	J0525 + 1115	0,35443759451370	29,84
36	J0528 + 2200	3,74551267840	28,41
37	J0536 – 7543	1,24585559629	28,79
38	J0543 + 2329	0,2459747688901	29,26
39	J0601 – 0527	0,3959691695432	29,36
40	J0612 + 3721	0,29798232657184	27,56
41	J0614 + 2229	0,33495996611	29,23
42	J0624 – 0424	1,0390764758510	29,17

Таблица 1 (продолжение)

<i>N</i>	PSR	<i>P</i>	$\lg L_r$
43	J0629 + 2415	0,476622836038	28,89
44	J0630 – 2834	1,24441859615	29,74
45	J0653 + 8051	1,2144405115160	28,00
46	J0659 + 1414	0,384891195054	27,48
47	J0700 + 6418	0,19567094516631	27,13
48	J0729 – 1836	0,51016034483	28,65
49	J0738 – 4042	0,374919985032	31,08
50	J0742 – 2822	0,166762291572	29,17
51	J0745 – 5353	0,2148363514	30,26
52	J0754 + 3231	1,442349479143	28,57
53	J0758 – 1528	0,6822651758060	28,05
54	J0809 – 4753	0,547199235502	30,46
55	J0814 + 7429	1,292241446862	27,67
56	J0820 – 1350	1,2381295438682	28,98
57	J0820 – 4114	0,54544553611	29,57
58	J0823 + 0159	0,8648728046988	28,08
59	J0826 + 2637	0,53066051169	27,31
60	J0837 + 0610	1,2737682915785	28,08
61	J0837 – 4135	0,751623617646	29,30
62	J0840 – 5332	0,72061236106	29,62
63	J0846 – 3533	1,116097163402	27,85
64	J0855 – 3331	1,267535702756	27,49
65	J0907 – 5157	0,253556015011	29,48
66	J0908 – 1739	0,40162562344216	27,41
67	J0908 – 4913	0,10675459250	30,80
68	J0921 + 6254	1,567994018480	26,56
69	J0922 + 0638	0,430619453205	29,15
70	J0934 – 5249	1,4447714964	28,44
71	J0942 – 5552	0,66436748807	29,93
72	J0943 + 1631	1,087417728071	28,23
73	J0944 – 1354	0,5702641245619	27,18
74	J0946 + 0951	1,09770570486	27,97
75	J0953 + 0755	0,2530651649482	27,48
76	J0955 – 5304	0,86211773933	29,61
77	J1001 – 5507	1,43658262920	29,17
78	J1012 – 2337	2,51794502050	27,80
79	J1018 – 1642	1,804694945768	28,75
80	J1041 – 1942	1,386368074588	28,85
81	J1056 – 6258	0,422447188684	30,97
82	J1057 – 5226	0,197107608187	28,67
83	J1057 – 7914	1,3474021612	28,13
84	J1059 – 5742	1,18499893354	28,47
85	J1115 + 5030	1,656439759937	26,60

Таблица 1 (продолжение)

<i>N</i>	PSR	<i>P</i>	<i>lgL_r</i>
86	J1116 – 4122	0,943157882843	28,31
87	J1136 + 1551	1,187913065936	27,55
88	J1136 – 5525	0,36470557624	28,70
89	J1146 – 6030	0,27337242988	28,77
90	J1157 – 6224	0,400522048340	30,49
91	J1224 – 6407	0,2164762031209	28,64
92	J1239 + 2453	1,3824491030388	27,61
93	J1240 – 4124	0,51224209318	27,90
94	J1243 – 6423	0,388480921041	30,67
95	J1257 – 1027	0,6173076699955	27,88
96	J1305 – 6455	0,5716469444	31,07
97	J1311 – 1228	0,4475177112318	27,69
98	J1321 + 8323	0,670037418386	27,27
99	J1326 – 5859	0,47799086689	30,33
100	J1327 – 6222	0,5299062943	30,35
101	J1328 – 4357	0,53269880337	28,06
102	J1359 – 6038	0,12750077685	29,90
103	J1401 – 6357	0,842789632370	28,63
104	J1428 – 5530	0,570290462862	28,67
105	J1430 – 6623	0,785440757324	28,90
106	J1453 – 6413	0,1794847539641	28,97
107	J1456 – 6843	0,2633768148933	28,69
108	J1509 + 5531	0,739681922904	29,12
109	J1532 + 2745	1,124835742767	27,16
110	J1534 – 5334	1,36888090921	27,90
111	J1543 + 0929	0,748448416229	29,87
112	J1543 – 0620	0,709064069786	27,81
113	J1555 – 2341	0,5325777412091	28,48
114	31555 – 3134	0,5181097798008	29,45
115	J1559 – 4438	0,2570560976508	28,89
116	J1600 – 5044	0,1926012327811	29,94
117	J1602 – 5100	0,86422735995	29,58
118	J1604 – 4909	0,327417572788	28,94
119	J1605 – 5257	0,6580131007	28,61
120	J1607 – 0032	0,42181623358258	27,63
121	J1610 – 1322	1,018392746362	29,03
122	J1614 + 0737	1,206801436397	27,27
123	J1615 – 2940	2,47756787384	27,79
124	J1623 – 0908	1,2764458195155	28,04
125	J1635 + 2418	0,4905065128003	27,81
126	J1644 – 4559	0,455059775403	31,14
127	J1645 – 0317	0,387689698034	29,16
128	J1646 – 6831	1,7856112396	28,45

Таблица 1 (продолжение)

<i>N</i>	PSR	<i>P</i>	$\lg L_r$
129	J1651 – 1709	0,973393691872	28,14
130	J1651 – 4246	0,84408066596	30,75
131	J1652 – 2404	1,703739137858	28,18
132	J1659 – 1305	0,640958200232	28,41
133	J1703 – 1846	0,8043410792712	28,10
134	J1703 – 3241	1,211785094647	29,13
136	J1705 – 1906	0,2989874273426	27,83
136	J1709 – 1640	0,65305397126	28,26
137	J1711 – 1509	0,868804249026	27,55
138	J1717 – 3425	0,65629923146	30,87
139	J1720 – 0212	0,477715343692	30,32
140	J1720 – 1633	1,56560114802	28,15
141	J1720 – 2933	0,6204483653468	28,24
142	J1721 – 1936	1,00403745670	28,74
143	J1722 – 3207	0,477157518356	29,25
144	J1722 – 3712	0,236173191636	28,40
145	J1728 – 0007	0,3860037238349	28,24
146	J1731 – 4744	0,82982878524	29,93
147	J1733 – 2228	0,871682832986	28,29
148	J1735 – 0724	0,4193349661853	29,18
149	J1738 – 3211	0,768498945480	27,36
150	J1740 + 1311	0,803050264794	29,04
151	J1740 – 3015	0,60666591713	29,29
152	J1741 – 0840	2,043082458401	28,80
153	J1741 – 3927	0,512211401067	28,94
154	J1743 – 0339	0,44464510677	27,80
155	J1743 – 1351	0,405336948592	29,26
156	J1743 – 3150	2,41457551997	28,40
157	J1745 – 3040	0,367428753855	29,05
158	J1748 – 1300	0,3941333466126	28,90
159	J1750 – 3157	0,910362984150	28,97
160	J1751 – 4657	0,742352395470	28,59
161	J1752 – 2806	0,56255763553	29,41
162	J1754 + 5201	2,39139679486	28,64
163	J1757 – 2421	0,234100361641	29,44
164	J1759 – 2205	0,460974127869	28,54
165	J1801 – 0357	0,92149067377	29,01
166	J1803 – 2137	0,13361722916	29,13
167	J1803 – 2712	0,334415426505	28,42
168	J1807 – 0847	0,16372737166367	29,68
169	J1807 – 2715	0,827776461518	29,37
170	J1808 – 2057	0,918410326286	29,81
171	J1812 + 0226	0,793902802035	28,26

Таблица 1 (продолжение)

<i>N</i>	PSR	<i>P</i>	$\lg L_r$
172	J1813 + 4013	0,931089084936	28,63
173	J1816 – 1729	0,78231335990	28,79
174	J1817 – 3618	0,38701692095	28,70
175	J1818 – 1422	0,291488646514	30,10
176	J1820 – 0427	0,598075929665	29,14
177	J1820 – 1346	0,921459731325	29,63
178	J1822 – 2256	1,874268518252	29,05
179	J1823 + 0550	0,7529065430494	28,85
180	J1823 – 1115	0,279828696565	29,52
181	J1823 – 3021B	0,3785964790452	28,43
182	J1823 – 3106	0,284054344967	27,96
183	J1824 – 1118	0,435759033311	29,81
184	J1824 – 1945	0,189334989945	30,28
185	J1825 + 0004	0,778949400076	27,55
186	J1825 – 0935	0,76898422449	28,62
187	J1826 – 1131	2,093136309720	28,79
188	J1826 – 1334	0,101465857479	29,38
18,9	J1829 – 1751	0,307132975823	30,59
190	J1832 – 0827	0,64729271840	29,26
191	J1833 – 0338	0,68670444412	30,12
192	J1834 – 0010	0,520954311129	28,94
193	J1834 – 0426	0,2901081932010	29,93
194	J1835 – 0643	0,305830097712	29,54
195	J1836 – 0436	0,354236507718	28,61
196	J1836 – 1008	0,56271073614	30,69
197	J1837 – 0653	1,90580870607	29,89
198	J1840 + 5640	1,6528618528869	27,98
199	J1841 + 0912	0,381319294283	28,22
200	J1842 – 0359	1,839944315159	29,90
201	J1844 + 1454	0,37546337852	28,45
202	J1844 – 0244	0,507722322118	28,57
203	J1844 – 0433	0,991026616395	28,49
204	J1844 – 0538	0,255699268086	29,33
205	J1847 – 0402	0,597769151294	29,19
206	J1848 – 0123	0,65943205053	30,27
207	J1848 – 1952	4,30818959857	27,57
208	J1849 – 0636	1,451319471078	29,34
209	J1850 + 1335	0,3455818980725	28,24
210	J1851 + 0418	0,284697472498	29,53
211	J1851 + 1259	1,20530328456	27,79
212	J1854 – 1421	1,146594847118	28,46
213	J1856 + 0113	0,26743960949	29,02
214	J1857 + 0212	0,415823055263	29,59

Таблица 1 (продолжение)

<i>N</i>	<i>PSR</i>	<i>P</i>	<i>lgL_r</i>
215	J1900 – 2600	0,6122092044383	29,14
216	J1901 + 0156	0,2882191593441	28,24
217	J1901 + 0331	0,65545023949	30,48
218	J1901 + 0716	0,64399866351	28,74
219	J1902 + 0556	0,7465773564336	28,88
220	J1902 + 0615	0,673500326218	30,45
221	J1903 + 0135	0,729303862273	29,65
222	J1903 – 0632	0,43188708466	29,96
223	J1905 + 0709	0,64804005430	28,88
224	J1905 – 0056	0,643181259558	29,12
225	J1907 + 4002	1,235757452781	28,29
226	J1909 + 0007	1,01694836198	28,20
227	J1909 + 0254	0,989831207210	28,43
228	J1909 + 1102	0,283640352888	29,25
229	J1910 + 0358	2,33026282052	28,42
230	J1910 + 1231	1,441741592612	29,22
231	J1910 – 0309	0,504604607817	29,93
232	J1912 + 2104	2,232969028273	28,07
233	J1913 + 1400	0,5214727140817	28,68
234	J1913 – 0440	0,825935803096	28,82
235	J1915 + 1009	0,404540498447	29,89
236	J1915 + 1647	1,616231495126	28,14
237	J1916 + 0951	0,2702544395645	28,55
238	J1916 + 1312	0,28184240740	29,68
239	J1917 + 1353	0,194630982798	29,28
240	J1918 + 1444	1,18102329730	27,25
241	J1919 + 0021	1,27226037471	28,56
242	J1920 + 2650	0,785521849527	27,27
243	J1921 + 1419	0,618182590832	28,94
244	J1921 + 1948	0,821035080573	30,08
245	J1921 + 2153	1,3373021601895	28,25
246	J1922 + 2110	1,07792434298	30,28
247	J1926 + 0431	1,074078173597	28,62
248	J1926 + 1434	1,324921971385	29,80
249	J1926 + 1648	0,57982281497	29,08
250	J1932 + 1059	0,226517634984	27,16
251	J1932 + 2020	0,268217402985	30,59
252	J1932 + 2220	0,14446976514	29,53
253	J1935 + 1616	0,3587384107696	30,19
254	J1937 + 2544	0,20098020244218	28,72
255	J1941 – 2602	0,4028579088754	28,53
256	J1943 – 1237	0,9724288509136	27,30
257	J1944 + 1755	1,9968990135	27,97

Таблица 1 (продолжение)

<i>N</i>	PSR	<i>P</i>	$\lg L_r$
258	J1944 – 1750	0,841157774341	28,89
259	J1945 – 0040	1,045632444772	28,45
260	J1946 + 1805	0,4406184769108	27,83
261	J1946 – 2913	0,959447931541	28,55
262	J1948 + 3540	0,717311174076	30,41
263	J1949 – 2524	0,957616630291	27,18
264	J1954 + 2923	0,4266767865302	26,43
265	J1955 + 5059	0,5189379874091	27,99
266	J2002 + 3217	0,6967605102	28,92
267	J2002 + 4050	0,9050668203089	29,83
268	J2004 + 3137	2,11126473382	29,14
269	J2006 – 0807	0,580871337031	28,82
270	J2013 + 3845	0,2301936138595	30,57
271	J2018 + 2839	0,5579534804225	28,80
272	J2022 + 2854	0,3434021577859	28,60
273	J2022 + 5154	0,529196917808	28,77
274	J2023 + 5037	0,372619054536	27,69
275	J2029 + 3744	1,216804657740	29,74
276	J2030 + 2228	0,630512646679	28,62
277	J2037 + 3621	0,61871508419	28,01
278	J2038 + 5319	1,424568215153	28,66
279	J2046 + 1540	1,1382856833155	28,38
280	J2046 + 5708	0,476734842147	28,70
281	J2046 – 0421	1,5469381168652	28,78
282	J2048 – 1616	1,961572303613	28,23
283	J2053 – 7200	0,341336231373	28,31
284	J2055 + 2209	0,8151811027646	27,73
285	J2055 + 3630	0,2215076382770	29,49
286	J2108 + 4441	0,4148705368737	29,73
287	J2113 + 2754	1,2028517540847	27,66
288	J2113 + 4644	1,014684793189	30,39
289	J2116 + 1414	0,4401530669475	28,51
290	J2129 + 1210A	0,1106647087715	29,06
291	J2149 + 6329	0,38014034472	30,00
292	J2150 + 5247	0,3322056715409	29,35
293	J2155 – 3118	1,030002112040	27,17
294	J2157 + 4017	1,525265633965	30,05
295	J2212 + 2933	1,004592528853	28,70
296	J2219 + 4754	0,5384688219194	29,35
297	J2225 + 6535	0,682538228276	28,34
298	J2229 + 6205	0,443054560638	29,34
299	J2242 + 6950	1,664500786185	27,75
300	J2248 – 0101	0,477233119123	28,21
301	J2257 + 5909	0,368246454342	29,86

Таблица 1 (окончание)

<i>N</i>	PSR	<i>P</i>	$\lg L_r$
302	J2305 + 3100	1,575886338359	28,68
303	J2308 + 5547	0,4750676748022	28,73
304	J2313 + 4253	0,3494336821331	28,11
306	J2317 + 2149	1,444653102317	27,76
306	J2321 + 6024	2,256488426824	29,38
307	J2325 + 6316	1,436309536149	29,82
308	J2326 + 6113	0,2336519694946	29,07
309	J2330 – 2005	1,643622185327	27,00
310	J2337 + 6151	0,495300358537	28,33
311	J2354 + 6155	0,944783886655	28,69

Таблица 2

Радиосветимости 27 быстрых пульсаров

<i>N</i>	PSR	<i>P</i>	$\lg L_r$
1	J0034 – 0534	0,0019	29,62
2	J0437 – 4715	0,005757	28,97
3	J0534 + 2200	0,03308471603	31,60
4	J0613 – 0200	0,003062	29,54
5	J0711 – 6830	0,005491	28,98
6	J0835 – 4510	0,089328385024	29,23
7	J1045 – 4509	0,007474	29,89
8	B1257 + 12	0,006219	30,40
9	J1302 – 6350	0,047762053542	30,22
10	J1455 – 3330	0,008	28,32
11	B1534 + 12	0,037904	29,21
12	B1620 – 26	0,011076	29,75
13	J1643 – 1224	0,004621	31,25
14	J1713 + 0747	0,004570	28,39
15	J1730 – 2304	0,008123	29,28
16	J1804 – 2717	0,009343	30,03
17	J1833 – 0827	0,0852842512617	29,75
18	B1855 + 09	0,005362	28,39
19	B1913 + 16	0,059030	29,65
20	B1937 + 21	0,001558	30,87
21	J1952 + 3252	0,0395311928556	28,97
22	B1953 + 29	0,006133	30,60
23	B1957 + 20	0,001607	29,96
24	J2124 – 3358	0,004931	27,18
25	J2145 – 0750	0,016052	28,79
26	J2229 + 2643	0,002978	29,23
27	J2317 + 1439	0,003445	29,06

частей сравнимы и составляют 20÷30% (однако для некоторых объектов этот вклад может достигать 70%) [61].

К основным ошибкам в формуле (11) приводит неточное знание расстояний до пульсаров (множитель d^2). В результате вычисленные значения светимости могут отличаться от действительных значений в несколько раз. Поэтому все остальные ошибки на данном этапе исследований можно считать несущественными.

Особо следует остановиться на величинах светимостей короткопериодических пульсаров ($P < 0,1$ с). В настоящее время сложилось мнение о том, что их светимости меньше, чем у нормальных пульсаров. Однако этот вывод основывается либо на грубых оценках по формуле (12), либо на предположении о резком уменьшении потока на частотах ниже 100 МГц [62]. Однако в спектрах пульсаров с $P < 0,1$ с до сих пор реальные завалы не обнаружены [63, 64]. Так, для наиболее изученного миллисекундного пульсара PSR B1937 + 21 линейный спектр может быть прослежен до частоты 26 МГц [65]. В работе [66] утверждается, что в таких спектрах завалов быть не должно вплоть до очень низких частот. Оценки частоты, где может оказаться существенным синхротронное самопоглощение [67], дают величины ν_m порядка нескольких мегагерц (в крайнем случае, десятков мегагерц). Светимости короткопериодических пульсаров, вычисленные в предположении о линейном спектре до частоты 30 МГц, оказались в среднем примерно на порядок выше ($\langle \lg L \rangle = 29,52$), чем у пульсаров с $P > 0,1$ с ($\langle \lg L \rangle = 28,75$). Рис. 11 показывает, что, если завал в спектре быстрого пульсара начинается на частоте выше 30 МГц, заштрихованные части компенсируют друг друга, и ошибка в величине интеграла будет небольшой.

Сравнение полученных значений светимостей с данными каталога [68] показывает (рис. 12), что существует сильная корреляция величин L_r и L_1 . Прямая на рис. 12 проведена по методу наименьших квадратов:

$$\lg L_r \text{ (эрг/с)} = (1,03 \pm 0,03) \lg L_1 \text{ (мЯн} \cdot \text{кпк}^2) + 26,46 \pm 0,07 \quad (19)$$

при коэффициенте корреляции $K = 0,90 \pm 0,02$ для нормальных пульсаров и

$$\lg L_r \text{ (эрг/с)} = (0,82 \pm 0,15) \lg L_1 \text{ (мЯн} \cdot \text{кпк}^2) + 28,08 \pm 0,29, \quad (20)$$

$K = 0,74 \pm 0,14$ для быстрых пульсаров.

Высокая степень корреляции между $\lg L_r$ и $\lg L_1$ позволяет по известным значениям L_1 проводить статистическую оценку све-

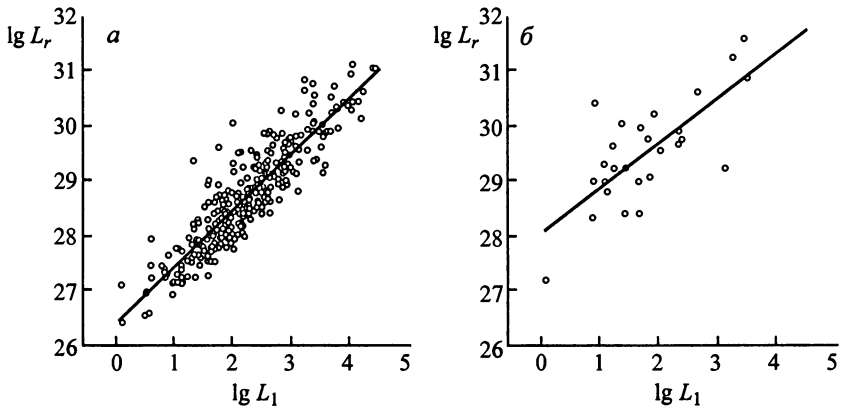


Рис. 12. Зависимости между вычисленными светимостями и оценками L_1 для 311 нормальных (а) и 27 быстрых (б) пульсаров

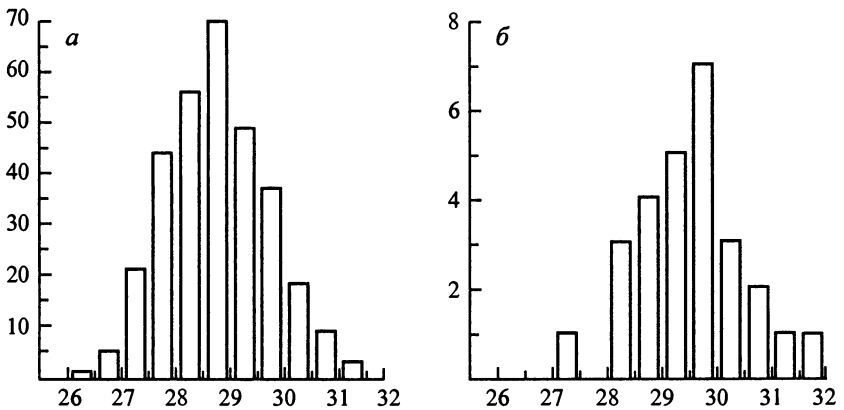


Рис. 13. Распределение вычисленных светимостей для 311 нормальных (а) и 27 быстрых (б) пульсаров

тисности в тех случаях, когда спектр пульсара не известен и нет возможности вычислить точное значение светимости.

На рис. 13 представлена гистограмма распределения радиосветимостей, которая характеризуется средними значениями $\langle \lg L \rangle = 28,75$ и $\langle \lg L \rangle = 29,52$ и среднеквадратичными отклонениями $\sigma_{\lg L} = 0,93$ и $\sigma_{\lg L} = 0,97$ для нормальных и быстрых пульсаров, соответственно. Оказывается, что 88% объектов имеют светимости в довольно узком интервале от 10^{27} до 10^{30} эрг/с в случае нормальных пульсаров и от 10^{28} до 10^{31} для быстрых пульсаров.

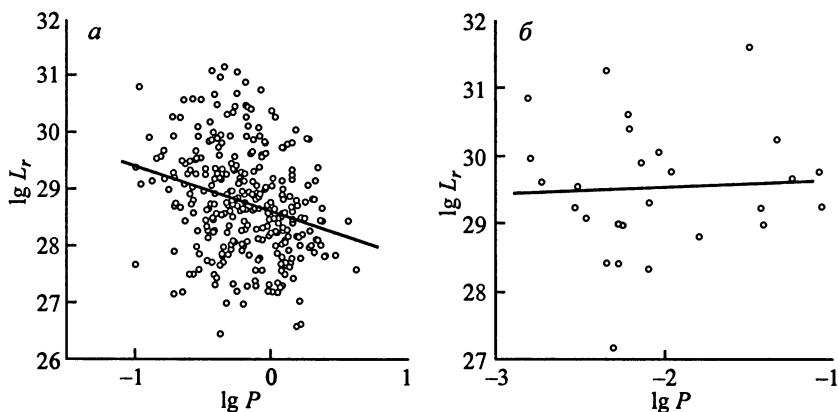


Рис. 14. Зависимость интегральной радиосветимости пульсара от его периода: *а)* нормальные пульсары, *б)* пульсары с короткими периодами

Представляет большой интерес поиск зависимостей светимости от других параметров пульсара. На рис. 14, *а* приведена диаграмма $\lg L_r$ ($\lg P$) с прямой, проведённой по методу наименьших квадратов:

$$\lg L_r = (-0,81 \pm 0,16) \lg P + 28,60 \pm 0,06. \quad (21)$$

Наблюдается тенденция увеличения светимости пульсара с уменьшением его периода, которая, как мы упоминали выше, продолжается и к миллисекундным пульсарам. Однако у короткопериодических пульсаров зависимость светимости от периода отсутствует (рис. 14, *б*).

Интересно было бы ответить на вопрос: как изменяется светимость с увеличением возраста пульсара? К сожалению, хороших оценок возраста этих объектов до сих пор не существует. Наилучшей в статистическом смысле оценкой их возраста можно считать по-видимому величину t_k , определяемую из кинематических соображений, а именно по z -координате (расстоянию от плоскости Галактики) объекта и его средней пространственной скорости, которую примем здесь равной 300 км/с [69]. На рис. 15 представлена диаграмма $\lg L_r$ ($\lg t_k$), которая показывает, что в течение нескольких миллионов лет светимость не изменяется. Таким образом, несмотря на свою нестационарность на коротких интервалах времени пульсар остаётся стабильным излучателем в среднем на протяжении миллионов лет.

Используя зависимости (19) и (20), можно построить функцию светимости пульсаров (рис. 16), которая обнаруживает два резких завала: при $\lg L > 32$ и при $\lg L < 26$. Первый соответ-

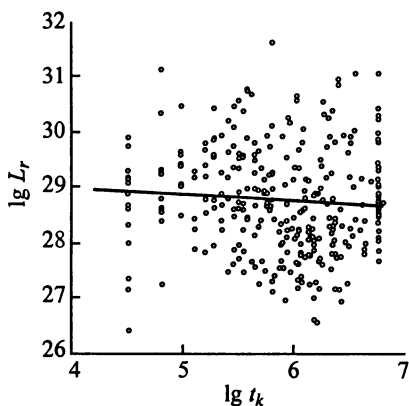


Рис. 15. Зависимость интегральной радиосветимости пульсара от его возраста

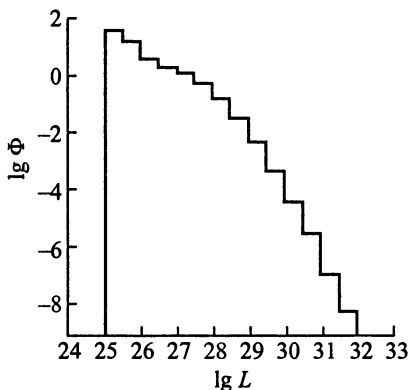


Рис. 16. Функция распределения радиосветимостей для 640 пульсаров

ствуется очевидному требованию, чтобы к.п.д. трансформации энергии основного источника в радиоизлучение не превышал 100%. Что касается второго, то он свидетельствует о наличии нижнего предела на этот к.п.д. и накладывает соответствующие ограничения на рассматриваемые модели пульсаров. Отсутствие пульсаров со светимостями меньше 10^{26} эрг/с нельзя объяснить эффектами селекции, поскольку современная чувствительность радиометров позволяет обнаружить такие объекты.

Полученная функция светимости даёт возможность оценить полное число пульсаров в нашей Галактике:

$$N = \frac{V_{\Gamma}}{\delta} \int_0^{\infty} \Phi(\lg L) d \lg L.$$

Объём Галактики $V_{\Gamma} = 4\pi R_{\Gamma}^2 h$ при $R_{\Gamma} = 15$ кпк и $h \sim 1$ кпк равен 2800 кпк³. Доля наблюдаемых пульсаров определяется отношением ширины наблюдаемого импульса к периоду пульсара. Для использованной выборки можно положить [70] $\delta = 0,074$. В результате получаем, что число активных пульсаров в Галактике в настоящее время равно $2 \cdot 10^5$. При времени жизни пульсара порядка 10 млн лет это число соответствует скорости рождения пульсаров порядка одного объекта в 40 лет. Такая оценка согласуется со скоростью появления сверхновых (СН) как в нашей Галактике (одна СН в 20÷30 лет) [28], так и во внешних галактиках (одна СН в 20÷40 лет) [71].