

## НАБЛЮДЕНИЯ МАГНИТАРА SGR J1830–0645 И ПУЛЬСАРА J0250+5854 НА ЧАСТОТЕ 111 МГц

© 2022 г. Б. Я. Лосовский<sup>1,\*</sup>, А. П. Глушак<sup>1,\*\*</sup>

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

\*E-mail: blos@prao.ru

\*\*E-mail: glushak@prao.ru

Поступила в редакцию 30.06.2022 г.

После доработки 24.09.2022 г.

Принята к публикации 30.09.2022 г.

С января 2021 г. и по настоящее время в Пушчинской радиоастрономической обсерватории Физического института им. П.Н. Лебедева АН России (ПРАО АКЦ ФИАН) на частоте 111 МГц на антенне БСА проводятся поисковые наблюдения радиосигналов нового магнитара SGR J1830–0645. По данным обработки наблюдений за 2021 г. периодические или импульсные радиосигналы не были обнаружены. Верхний предел оценки плотности потока радиоизлучения SGR J1830–0645 на 111 МГц составляет 500 мЯн. В качестве контрольного радиоисточника используется 23.5-секундный радиопульсар J0250+5854. Выполнен тайминг импульсов, измерены и рассчитаны параметры J0250+5854.

*Ключевые слова:* нейтронные звезды, пульсар, магнитар, радиотранзиент

DOI: 10.31857/S0004629922110135

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Запуски ракет, а впоследствии и космических аппаратов, стимулировали развитие внеатмосферной всеволновой астрономии и позволили проводить исследования космических объектов в ранее недоступных из-за влияния атмосферы инфракрасном, рентгеновском и гамма-диапазонах частот. К числу таких объектов относятся и пульсары. Известно, что пульсары суть нейтронные звезды, впервые зафиксированные в радиодиапазоне как космические маяки – источники периодического, от тысячных долей секунды до десятков секунд, радиоизлучения. Масса пульсара  $M_p \sim 2 \times 10^{33}$  г, радиус  $R \sim 10$  км. Периоды вращения пульсаров  $P$  со временем увеличиваются за счет торможения пульсара, связанного с потерей энергии вращения из-за магнито-дипольного излучения и пульсарного ветра. Производная периода  $dP/dt$  у секундных пульсаров составляет  $\sim 10^{-15}$  с/с, у миллисекундных  $\sim 10^{-19}$  с/с. В предположении дипольной конфигурации магнитного поля и магнито-дипольного механизма торможения в вакууме величина индукции магнитного поля на полюсе у секундных пульсаров может быть оценена по формуле

$$B_{\text{dip}} = 6.4 \times 10^{19} (PdP/dt)^{1/2} \quad (1)$$

и составляет  $10^{12}–10^{13}$  Гс, и вдвое превышает величину индукции магнитного поля на экваторе. Энергия вращения пульсара  $E_{\text{rot}} = I\Omega^2/2 \sim 10^{45}–10^{52}$  эрг, где  $\Omega$  – угловая частота вращения:  $\Omega = 2\pi/P$ , а  $I$  – момент инерции:  $I = 10^{45}$  г см<sup>2</sup>. Скорость потерь энергии  $dE_{\text{rot}}/dt = I\Omega(d\Omega/dt) = 4\pi^2 I(dP/dt)/P^3 \sim 10^{31}–10^{34}$  эрг/с. Важнейшей энергетической характеристикой пульсаров является их радиосветимость. Для приближенной оценки этой величины применяется формула

$$L_R \sim \pi^3 d^2 W_{50} S_{400} \Delta\nu/P \text{ эрг/сек}, \quad (2)$$

где  $d$  – расстояние до пульсара,  $S_{400}$  – средняя плотность потока на частоте 400 МГц и  $\Delta\nu$  – ширина полосы частот спектра (принимается 400 МГц). Радиосветимости большинства пульсаров  $L_R \sim 10^{28}–10^{30}$  эрг/с. Это значит, что для радиопульсаров  $L_R < dE_{\text{rot}}/dt$ . Источником энергии для всех процессов в пульсарах, за исключением магнитаров, является кинетическая энергия вращения нейтронной звезды (например [1–3]).

В последнее время особое внимание исследователей привлекают пульсары, излучающие в рентгеновском и гамма-диапазоне: аномальные рентгеновские пульсары (АХР), повторные источники мягкого гамма-излучения (SGR) и ней-

тронные звезды со слабым рентгеновским излучением (XDINS). Оценка индукции магнитного поля у этих объектов, рассчитанная в предположении магнито-дипольного механизма торможения (см. формулу (1)), составляет  $10^{14}$ – $10^{15}$  Гс, что на два-три порядка превышает магнитные поля обычных пульсаров. Нейтронные звезды, обладающие такими характеристиками, названы магнитарами. Они характеризуются секундными периодами  $\sim 5$ – $12$  с и производными периода  $\sim 10^{-13}$ – $10^{-10}$  с/с. Рентгеновские светимости  $L_x$  находятся в пределах  $10^{32}$ – $10^{36}$  эрг/с. Расход энергии на торможение магнитара  $L = dE_{\text{rot}}/dt \sim 10^{33}$  эрг/сек, что меньше его светимости  $L_x$ , таким образом, для магнитаров, в отличие от радиопулсаров,  $L_x > dE_{\text{rot}}/dt$ . Основным источником энергии для процессов в магнитаре является магнитная энергия нейтронной звезды [1–3].

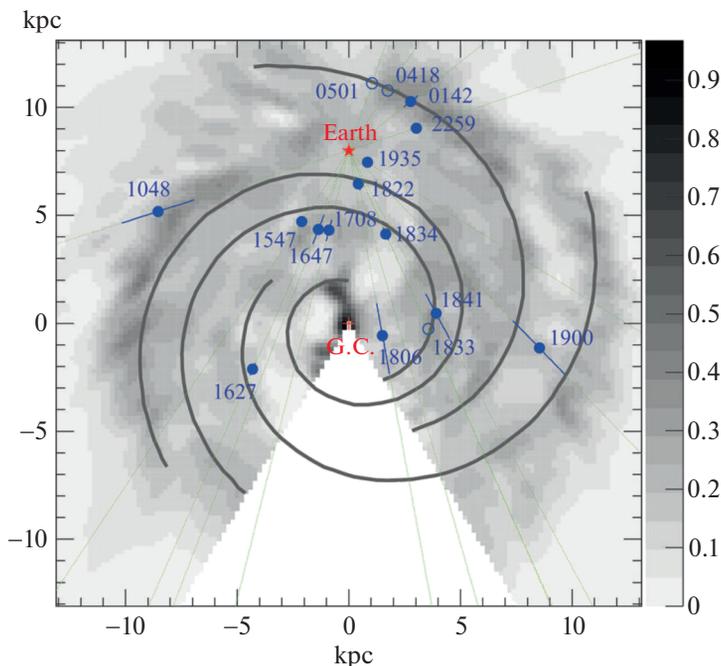
Излучение магнитаров, в частности, характеризуется короткопериодической и долгопериодической вспышечной активностью с короткими (миллисекунды – доли секунд) энергичными эпизодами  $10^{39}$ – $10^{47}$  эрг/с (bursts) и длительными (годы) умеренными событиями  $10^{34}$ – $10^{36}$  эрг/с (outbursts) [4].

Телескоп большой площади имени Ферми (Fermi Large Area Telescope) обнаружил более 117 гамма пульсаров [5]. Из них 42 пульсара в отношении радиоизлучения классифицируются как активные (radio-loud), с плотностью потока более 30 мкЯн, а 38 – как спокойные (radio-quiet) с потоками менее 30 мкЯн на частоте 1400 МГц.

Грисмейер и др. [6] провели наблюдения 27 магнитаров северной полушеры с целью поиска импульсного радиоизлучения на низкой частоте. Наблюдения проводились на LOFAR (Low Frequency Array) на частоте 150 МГц. Радиоизлучение не было обнаружено, хотя в пяти гамма-пульсарах радиоизлучение фиксировалось ранее на частотах выше 800 МГц. Полученный верхний предел плотности потока оценивается  $< 26$  мкЯн. Поскольку спектр плотности потока пульсаров в среднем характеризуется степенным законом  $S \sim \nu^\alpha$ , это соответствует спектральному индексу  $\alpha > -3.1$ . Обнаружение радиоизлучения позволяет определить меру дисперсии и оценить расстояние до пульсара. Исследования магнитаров сосредоточены в основном на высоких частотах до 1000 МГц и более. При этом зарегистрировать радиоизлучение удается не всегда. Наблюдения на низких частотах, около 100 МГц, представляют интерес по двум причинам. Во-первых, спектр радиоизлучения пульсаров, как указывалось выше, характеризуется степенным законом со спектральным индексом  $\alpha$ , в большинстве случаев от  $-1$  до  $-3$ . Во-вторых, ширина диаграммы излучения многих пульсаров увеличивается с уменьшением частоты. В-тре-

тых, увеличивается рассеяние излучения. Это позволяет иногда обнаружить радиосигнал, если конус радиоизлучения пересечет Землю [6]. Ранее Глушаком и др. [7] сообщалось об обнаружении на БСА ПРАО ФИАН радиоизлучения на частоте 111 МГц от магнитара SGR 0418+5720 и о подтверждении импульсного радиоизлучения от пульсара J1907+0919 (магнитар SGR 1900+14) [8]. Тимиреева и др. [9] провели поиск радиоизлучения магнитара J1836+5925 на 111 МГц на БСА. Они оценили величину верхнего предела плотности потока периодического радиосигнала в 82 мкЯн. Родин и Федорова [10] обнаружили радиоизлучение магнитара SGR 1935+2154 на частоте 111 МГц с плотностью потока 40 мкЯн и мерой дисперсии 320 пк/см<sup>3</sup>.

Установленный на борту космической Обсерватории Свифт имени Нила Герелса (Neil Gehrels Swift Observatory) телескоп 10 октября 2020 г. зафиксировал жесткий всплеск в рентгене, а последующие за ним наблюдения с помощью телескопа мягкого рентгена (Swift X-ray telescope) локализовали новый источник SGR J1830–0645 [4]. По результатам тайминга в течение 34 дней с 10 октября по 13 ноября 2020 г. были получены следующие результаты: сигнал периодический, период  $P = 10.415724(1)$  с, производная периода  $dP/dt = 7(1) \times 10^{-12}$  с/с на эпоху 59133.0 MJD. Следующая отсюда по формуле (1) оценка магнитной индукции дипольного поля  $B_{\text{dip}}$  на полюсе составила  $\sim 5.5 \times 10^{14}$  Гс, потери энергии вращения  $dE_{\text{rot}}/dt \sim 2.4 \times 10^{32}$  эрг/с, а характеристический возраст  $\tau_c = P/(2dP/dt) \approx 24000$  лет. Расстояние до пульсара оценено в пределах от 4 до 10 кпк. Максимальная светимость в пределах энергий 0.3–10 кэВ составляет  $L_x \sim 6 \times 10^{35}$  эрг/с, что в сотни раз превышает  $dE_{\text{rot}}/dt$ . Эти результаты были подтверждены и уточнены позднее наблюдениями с помощью зонда NICER (Neutron Star Interior Composition Explorer) [4]. Наблюдения магнитара, выполненные в октябре-ноябре 2020 г. на радиотелескопе в Сардинии (Sardinia Radio Telescope) на частотах 1.5 и 6.8 ГГц и Парксе (Parkes) на частотах 0.96, 1.6, 2.4 и 3.4 ГГц, не выявили радиосигнала, превышающего 0.1 мкЯн [4]. Настоящая работа посвящена попытке обнаружения радиоизлучения от магнитара SGR J1830–0645 на радиотелескопе БСА ПРАО ФИАН на частоте 111 МГц. Параллельно с наблюдениями SGR J1830–0645 велись регулярные регистрации пульсара J0250+5854, период и мера дисперсии которого известны достаточно хорошо [11]. Его 23.5-секундный период вращения и  $B_{\text{dip}} \sim 5.1 \times 10^{13}$  Гс больше подходили к магнитарам. Позднее Глушаком он был классифицирован как происшедший из популяции магнитаров, а не из популяции пульсаров с сильным магнитным полем



**Рис. 1.** Пульсары SGRs и AXPs в галактической плоскости на фоне распределения плотности атомарного водорода (H1) по данным измерения в линии 21 см. Шкала плотности нанесена на оси ординат справа. Объекты с измеренными расстояниями помечены заполненными кружками, объекты с предполагаемыми расстояниями помечены открытыми кружками (рис. 17 в [14]).

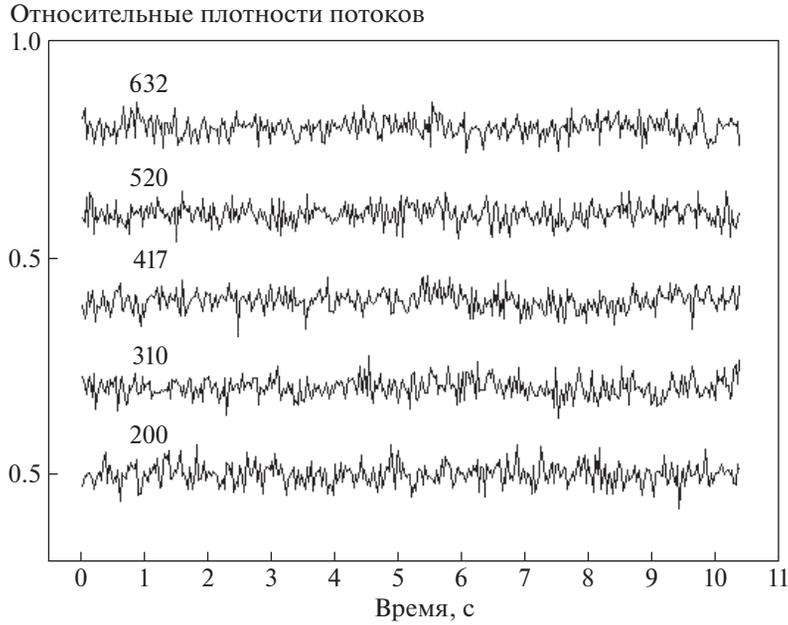
[12]. Еще его можно называть старым или спокойным магнитаром, так же, как пульсары типа XDINS.

## 2. НАБЛЮДЕНИЯ МАГНИТАРА SGR J1830–0645 НА 111 МГц

Поисковые наблюдения радиосигналов нового магнитара SGR J1830–0645 ведутся с января 2021 г. в ПРАО АКЦ ФИАН на радиотелескопе БСА ФИАН на центральной частоте 111 МГц. В качестве регистратора используется 512-канальный цифровой пульсарный приемник с полосой пропускания 2.5 МГц (4.88 кГц на канал, диапазон рабочих частот 109.5–112.0, интервал считывания сигнала кратен 1.2288 мс). Поляризация линейная в направлении Восток–Запад. Эффективная площадь БСА составляет  $20000 \pm 2000 \text{ м}^2$  [13]. Радиотелескоп БСА ФИАН является меридианным инструментом, и длительность единичной записи космического источника радиоизлучения определяется временем его прохождения через диаграмму направленности антенны, что в зависимости от склонения составляет около 3 и более минут. Эфемериды наблюдений рассчитывались с учетом периода и производной пульсара по данным [4]. Галактические координаты магнитара SGR J1830–0645 близки к галактическим координатам SGR J1833–0832, Swift J1834.9–064 и 1E 1841–045, которые, как полагают [14], распо-

ложены в рукаве Центавра нашей Галактики, поэтому магнитар SGR J1830–0645 также может находиться в этом спиральном рукаве (рис. 1). Ближний край рукава расположен от Земли на расстоянии, превышающем 3 кпк, что соответствует  $DM \sim 100 \text{ пк/см}^3$  согласно современной модели распределения меры дисперсии [15]. Мы исходим из оценки расстояния до магнитара, близкой к 10 кпк [4], согласно которой, следуя модели [15], этому расстоянию соответствует мера дисперсии  $DM \sim 417 \text{ пк/см}^3$ .

Учитывая отсутствие надежных оценок расстояния и, соответственно, меры дисперсии до SGR J1830–0645, обработка наблюдений проводилась с перебором мер дисперсии в интервале от 100 до 700  $\text{пк/см}^3$  с шагом в 5  $\text{пк/см}^3$ , достаточным для регистрации гипотетического сигнала в заданном интервале мер дисперсии на частоте 111 МГц. Наблюдения с помехами исключались. Примеры результатов обработки 95 дней наблюдений для промежуточных значений мер дисперсии 200, 310, 417, 520 и 632  $\text{пк/см}^3$  приведены на рис. 2. Графики получены путем суммирования наблюдательных данных в одном периоде с фиксированной фазой. Как видно из рис. 2, достоверный сигнал не обнаруживается. Это подтверждается обработкой результатов наблюдений и при других мерах дисперсии. Ниже приводятся результаты обработки наблюдений магнитара



**Рис. 2.** Усредненные записи пульсара J1830–0645 в пределах одного периода по результатам 95 дней наблюдений за 2021 г., полученные на частоте 111 МГц для указанных на рисунке мер дисперсии. Графики получены путем суммирования наблюдательных данных в одной фазе, выполнены в одном масштабе и разнесены вдоль оси ординат.

J1830–0645 на частоте 111 МГц, выполненных с 16 января 2021 по 26 декабря 2021 г.

Предельная чувствительность антенны  $S_{\min}$  в мЯн ( $1 \text{ мЯн} = 10^{-29} \text{ Вт/м}^2 \text{ с}$ ), в предположении, что эффективная площадь уменьшается по косинусу зенитного расстояния, определялась по формуле [16]

$$S_{\min} = 2kT_{\text{sys}}/[A_{\text{eff}} \cos z(\Delta t_s \Delta \nu)^{1/2}] \text{ (мЯн)} = T_{\text{sys}}/[G \cos z(\Delta t_s \Delta \nu)^{1/2}] \text{ (мЯн)}, \quad (3)$$

где  $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ Дж/К}$  – постоянная Больцмана,  $T_{\text{sys}} = T_r + T_b$  температура приемной системы ( $T_r$  – температура приемника = 300 К,  $T_b$  – температура фона),  $G = A_{\text{eff}}/2k$  – коэффициент усиления антенны. При эффективной площади  $A_{\text{eff}} = 20\,000 \text{ м}^2$  коэффициент усиления  $G$  составит 7.25 К/Ян. Время накопления  $\Delta t_s$  равняется длительности отсчета 29.5 мс, умноженной на 18 периодов в день и на 95 дней наблюдений, т.е. 50.445 с. Полоса частот  $\Delta \nu = 2.5 \text{ МГц}$ ,  $z$  – зенитное расстояние. Пульсар расположен в галактической плоскости и температура фона в направлении на пульсар на частоте 178 МГц по изофотам яркостной температуры [17] составляет  $\sim 2000 \text{ К}$ . Если принять спектральный индекс фона  $\beta = 2.55$  ( $T_b \sim \nu^{-\beta}$ ) [13] и пересчитать температуру на частоте 111 МГц, то получается 6668 К. Широта телескопа  $\varphi = 54^\circ 49'$ , склонение пульсара  $\delta = -6^\circ 45'$ ,

$z = \varphi - \delta = 61^\circ 34'$  и  $\cos z = 0.476$ . Получаем минимальную величину шума

$$S_{\min} = (300 + 6668)/[7.25 \times 0.476(50.445 \times 2.5)^{1/2}] = 180 \text{ мЯн}. \quad (4)$$

Отношение сигнала к шуму для регистрации на практике составляет  $\geq 3$ . Если принять отношение сигнал/шум равным 3, то  $S_{\min}$  составит 540 мЯн. Величину  $\sim 500 \text{ мЯн}$  можно рассматривать как верхний предел плотности потока магнитара на 111 МГц.

Наблюдения магнитара на европейских радиотелескопах, частично входящих в систему VLBI, проводились по согласованной программе с 11 октября 2020 по 4 февраля 2021 г. Чтобы обеспечить наибольший диапазон частот, применялись полосы Р (300–364 МГц), L (1336–1720 МГц),  $C_1$  (4798–5310 МГц),  $C_2$  (6500–6756 МГц) и X (8287–8543 МГц). Данные передавались в Космическую Обсерваторию Онсала (Швеция) для обработки. Верхние оценки энергии (fluence limits) не превышают 65 Ян мс [18].

Наблюдения магнитара на 100-метровом радиотелескопе Грин Бэнк 13 октября 2020 г. проводились в полосе S (1200–2800 МГц) и в полосе  $C_2$ . Никакого импульсного или периодического сигнала не было зафиксировано. Получены оценки величины верхнего предела плотности потока, равные 7.8 и 6.2 мЯн соответственно [18].

К поиску радиоизлучения был привлечен 34-метровый радиотелескоп, входящий в систему Deep Space Network, расположенный в Канберре (Австралия). Наблюдения выполнялись 12 октября 2020 г. Получены верхние пределы плотности потока в S-полосе 0.14 мЯн и в X-полосе 0.08 мЯн [18].

Отсутствие радиоизлучения от магнитара SGR J1830–0645 на мегагерцах и гигагерцах характерно для большинства магнитаров. Радиоизлучение зафиксировано лишь у нескольких магнитаров в основном на высоких частотах (гигагерцах), оно проявляется в виде радиотранзиентов в периоды умеренной активности магнитаров. Спектр магнитаров проявляется в разных формах: нормальный, плоский, инвертированный и их комбинация [18–20].

### 3. НАБЛЮДЕНИЯ ПУЛЬСАРА J0250+5854

С января 2019 г. и по настоящее время в ПРАО АКЦ ФИАН на частоте 111 МГц ведутся наблюдения 23.5-секундного радиопульсара J0250+5854. Он служит в качестве опорного для контроля за наблюдениями магнитара.

Пульсар J0250+5854 был открыт с помощью радиотелескопа LOFAR в рамках программы Tied-Array All-Sky Survey (LOTAAS) на частоте 135 МГц [11]. До недавнего времени он имел самый большой период среди радиопульсаров, более подходящий для магнитаров. Однако пульсар не был обнаружен в рентгеновском диапазоне. Он принадлежит к числу пульсаров с длинными периодами: PSR J1814–1744 4.0 с [21]; PSR J1847–0130 6.7 с [22]; PSR J2144–3933 8.5 с [23]; PSR J2251–3711 12.1 с [24]. Новый радиопульсар J0901–4046, открытый группой ученых, работающих на радиотелескопе MeerKAT Южноафриканской радиоастрономической обсерватории, имеет период 75.88 с, более чем втрое превышающий период 23.5 с [25]. Недавно получено сообщение об открытии необычно медленного радиотранзиента с периодом 18.18 мин [26]. Пульсары с длинными периодами находятся вблизи линии прекращения радиоизлучения (“линия смерти”) или за “линией смерти” и согласно теоретическим моделям не должны излучать в радиодиапазоне (рис. 3).

Показанные на рисунке “линии смерти”, соответствующие различным моделям выключения пульсара, рассчитаны на основе модели Рудермана-Сазерленда [29]. Вращающаяся в вакууме намагниченная звезда должна генерировать магнитным полем сильные электрические поля. Электроны, ускоренные электрическим полем в вакуумном зазоре с размером  $\sim 100$  м, расположенном над поверхностью звезды, генерируют гамма-кванты, которые рождают каскад электрон-позитронных пар, вызывающих радиоизлу-

чение кривизны. Для поддержания процесса непрерывной генерации электрон-позитронных пар разность потенциалов в зазоре должна быть  $\sim 10^{12}$  вольт. С увеличением периода напряженность электрического поля уменьшается, а размер зазора увеличивается, обеспечивая необходимую разность потенциалов. При превышении величины зазора радиуса полярной шапки напряженность электрического поля резко падает по экспоненте и необходимая разность потенциалов уже не может поддерживаться. В результате генерация пар и вместе с ней радиоизлучение прекращаются. Детальное обсуждение различных модификаций прекращения радиоизлучения, основанных на этой модели, дано в [11].

Альтернативное объяснение процесса прекращения радиоизлучения пульсара предложили Szary et al. [30], в модели которых нет резкого выключения пульсара по мере эволюции. Радиоизлучение генерируется за счет энергии вращения и останавливается при условии, что эффективность радиоизлучения, определяемая как отношение энергии радиоизлучения к энергии вращения, не превышает 1%.

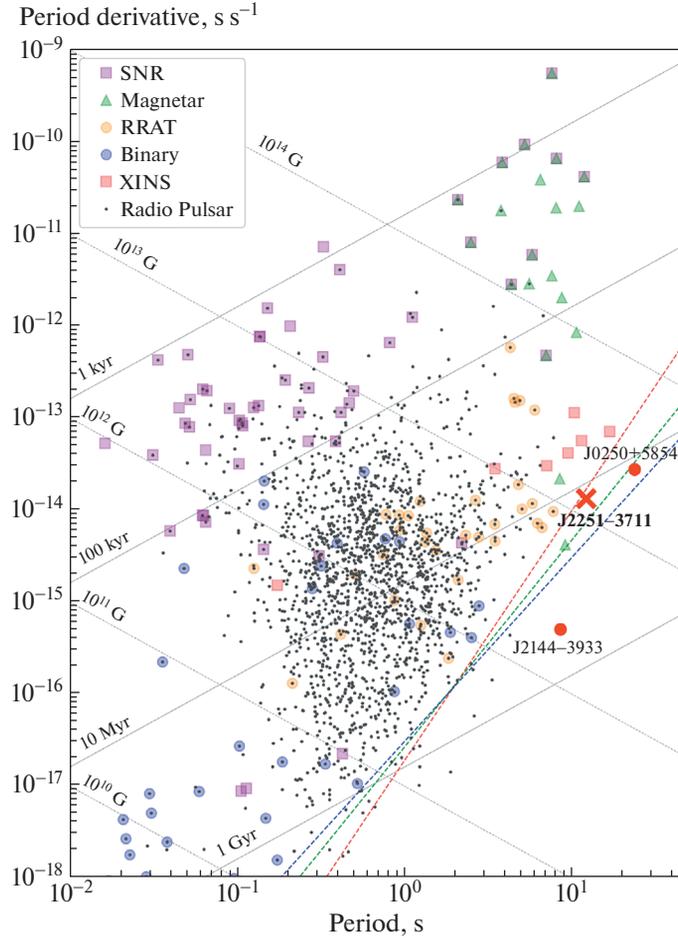
Малов и Мачабели [31] для объяснения наличия долгопериодических пульсаров, периоды которых выходят за пределы линии смерти, предложили оригинальную дрейфовую модель. В рамках этой модели дрейфовые плазменные волны, распространяющиеся поперек линий магнитного поля, вызывают на границе магнитосферы периодические изменения кривизны магнитных силовых линий и таким образом периодически модулируют направление радиоволн так, что наблюдаемый период оказывается в несколько раз больше периода вращения пульсара.

Ниже приводятся результаты обработки 211 дней наблюдений пульсара J0250+5854, выполненных на частоте 111 МГц с 16 апреля 2019 по 31 декабря 2021 г. По полученным данным рассчитана оценка плотности потока радиоизлучения пульсара согласно формуле

$$S_{111} = (S/N) T_{\text{sys}} / [G \cos z (\Delta t_s \Delta v)^{1/2}] \text{ (мЯн)}. \quad (5)$$

Для пульсара J0250+5854 отношение сигнал-шум  $(S/N) = 30.28$ . Температура системы  $T_{\text{sys}} = T_r + T_b$ , где  $T_r$  — температура приемника, равная 300 К. Температура фона  $T_b$  в направлении на пульсар на частоте 178 МГц по изофотам яркостной температуры [32] составляет  $\sim 500$  К. Если принять спектральный индекс фона 2.55 и пересчитать температуру на частоту 111 МГц, то получим 1668 К. Коэффициент усиления  $G = 3.0 \pm 0.5$  К/Ян был рассчитан по формуле (6), полученной перестановкой в формуле (5) параметров  $S_{111}$  и  $G$ ,

$$G = (S/N) T_{\text{sys}} / [S_{111} \cos z (\Delta t_s \Delta v)^{1/2}] \text{ (К/Ян)}, \quad (6)$$



**Рис. 3.** Диаграмма период – производная периода. В левом верхнем углу даны расшифровки условных символов сверху вниз соответственно: пульсары в остатках сверхновых, магнитары, транзиенты, двойные пульсары, одиночные рентгеновские пульсары и радиопульсары. Пунктирные линии показывают “линии смерти” для различных моделей: красная [27], зеленая и синяя [28]. Также показано положение трех долгопериодических пульсаров J2144–3953, J2251–3711 и J0250+5854 (рис. 3 в [24]).

где  $(S/N)$  – параметр сигнал-шум и  $S_{111}$  – плотности потоков опорных пульсаров V0809+74, V0834+06, V0950+08, V1919+21 и V2217+47 по данным [16] и [33].

Для PSR J0250+5854 время накопления  $\Delta t_s$  равняется длительности отсчета 7.3728 мс, умноженной на 15 периодов в день и на 211 дней наблюдений, т.е. 23.335 с. Полоса частот  $\Delta\nu = 2.5$  МГц. Широта телескопа  $\varphi = 54^\circ 49'$ , склонение пульсара  $\delta = 58^\circ 54'$ ,  $z = |\varphi - \delta| = 4^\circ 05'$  и  $\cos z \sim 1.0$ . В итоге получаем плотность потока J0250+5854

$$S_{111} = 30.28(300 + 1668) / [(3.0 \pm 0.5) \times (23.335 \times 2.5)^{1/2}] = 2600 \pm 433 \text{ (мЯн)}. \quad (7)$$

$S_{111}$  – максимальная величина плотности потока в импульсе. Чтобы получить усредненную по периоду плотность потока  $S_{\text{mean}}$ , надо умножить

$S_{111}$  на отношение полуширины импульса  $W$  к периоду  $P$ :

$$S_{\text{mean}} = S_{111} (W/P) \text{ (мЯн)}, \quad (8)$$

$$S_{\text{mean}} = (2600 \pm 433) \times 86.8 / 23535 = 9.6 \pm 1.6 \text{ мЯн}, \quad (9)$$

что в пределах ошибок согласуется с данными наблюдений LOFAR на частоте 119.6 МГц ( $8.0 \pm 1.4$  мЯн) [11]. Посредством аппроксимации профиля функцией Гаусса получено, что полуширина импульса  $W_{50}$  по наблюдениям на БСА ФИАН на 111 МГц составляет 86.8 мс, а ее отношение к периоду импульса равно 0.00369 (рис. 4), что соответствует 1.3284 в градусной мере. Принимая ошибку измерения в 16%, получим  $W_{50} = 1.3 \pm 0.2$ .

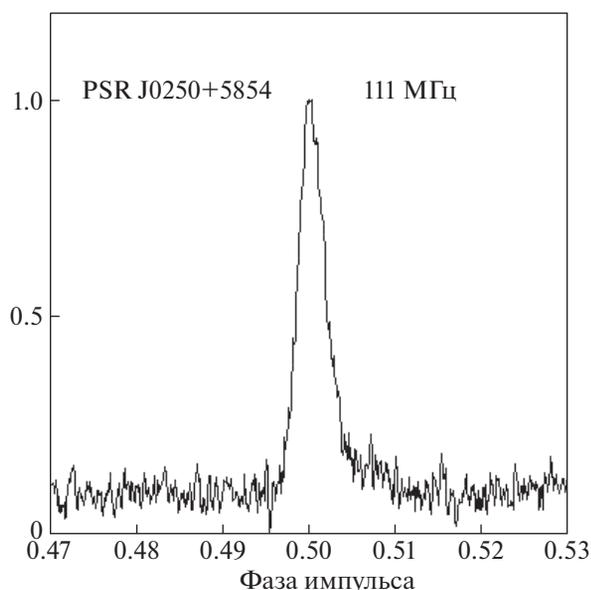
В табл. 1 по данным [34] приводятся результаты измерения  $W_{50}$  пульсара J0250+5854 в градус-

**Таблица 1.** Полуширина профиля  $W_{50}$  PSR J0250+5854 в функции частоты

Телескоп	Центральная частота (МГц)	$W_{50}$
FAST (Китай)	1250	$2.4 \pm 0.1$
GBT (США)	350	$1.08 \pm 0.07$
LOFAR (DE601-Германия)	154	$0.9 \pm 0.1$
LOFAR (UK608-Великобритания)	150	$0.9 \pm 0.1$
LOFAR Core (Нидерланды)	149	$1.21 \pm 0.03$
БСА (Россия)	111	$1.3 \pm 0.2$
NenuFAR (Франция)	57	$2.8 \pm 0.4$

ной мере на различных обсерваториях мира в широком диапазоне длин волн с включением данных БСА ПРАО АКЦ ФИАН, совпадающих с ними по времени наблюдения.

Наблюдаемое уменьшение ширины профиля  $W_{50}$  с увеличением частоты на низких частотах объясняется уменьшением рассеяния радиоизлучения в межзвездной среде. Показатель степени  $\gamma$  частотной зависимости рассеяния ( $\tau_{sc} \propto \nu^\gamma$ ) для нормального распределения неоднородностей рассеивающей среды равен  $-4$ . Увеличение  $W_{50}$  на высоких частотах интерпретируется в рамках модели “ядро-конус”. В этой модели на низких частотах форма импульса формируется узким центральным лучом, в то время как профили, полученные на высоких частотах, оказываются шире вследствие того, что к лучу присоединяется радиоизлучение конуса [34].



**Рис. 4.** Интегральный профиль импульса PSR J0250+5854 на частоте 111 МГц. Шкала абсцисс приведена в долях периода. На оси ординат плотность потока приведена в относительных единицах.

По данным наблюдений пульсара J0250+5854 проводился тайминг по программе TIMAPR [35]. В обработку включены данные за период с 16.04.2019 по 23.05.2022 (58590–59722 MJD). Обработано 285 сеансов. Применялась система астрономических постоянных DE200/LE200. В качестве исходных для обработки данных были приняты следующие параметры на эпоху 57973 MJD, полученные с учетом архивных данных LOTAAS:  $P = 23.535378476(1)$  с,  $dP/dt = 2.716(7) \times 10^{-14}$  [11]. С использованием рассчитанной в [12] регулярной второй производной  $d^2P/dt^2 = -2.4(1) \times 10^{-27}$  с/с<sup>2</sup> с помощью TIMAPR получены следующие параметры пульсара:  $P = 23.535378120(2)$  с,  $dP/dt = 2.750(2) \times 10^{-14}$  с/с. Результаты обработки сведены в табл. 2.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В Пушинской радиоастрономической обсерватории ПРАО АКЦ ФИАН на частоте 111 МГц продолжаются наблюдения нового магнитара SGR J1830–0645. По данным за 2021 г. периодическое или импульсное радиоизлучение на указанной частоте не было обнаружено. Измерен верхний предел плотности потока магнитара на 111 МГц:  $\sim 500$  мЯн. В качестве контрольного радиоисточника использовался 23.5-секундный радиопульсар J0250+5854. По данным наблюдений PSR J0250+5854 на 111 МГц плотность потока оценена в  $9.6 \pm 1.6$  мЯн. Ширина импульса на уровне половинной мощности составила 86.8 мс, а ее отношение к периоду импульса равно 0.00369, что соответствует  $\sim 1.3^\circ$  в градусной мере. Увеличение полуширины импульса на высоких частотах может быть объяснено в рамках модели радиоизлучения ядро-конус, в которой на высоких частотах к радиоизлучению ядра присоединяется радиоизлучение конуса, что и приводит к расширению импульса. Получены значения параметров пульсара на эпоху 57973 MJD: период  $P = 23.535378120(2)$  с, первая производная периода  $dP/dt = 2.750(2) \times 10^{-14}$  с/с, регулярная вторая производная периода  $d^2P/dt^2 = -2.4(1) \times 10^{-27}$  с/с<sup>2</sup>.

**Таблица 2.** Параметры PSR J0250+5854

Исходные параметры	Значение
Прямое восхождение $\alpha$ (2000)	02 <sup>h</sup> 50 <sup>m</sup> 17 <sup>s</sup> .78(3)
Склонение $\delta$ (2000)	58°54′01″.3(2)
Период вращения $P$	23.535378476(1) с
Производная периода вращения $dP/dt$	$2.716(7) \times 10^{-14}$ с/с
Мера дисперсии DM	45.281(3) пс/см <sup>3</sup>
Эпоха	57973 MJD
Временная шкала	UTC
Система астрономических постоянных	DE200/LE200
Измеренные и расчетные (*) параметры	Значение
Временной интервал	(58590–59722) MJD
Период вращения $P$	23.535378120(2) с
Производная периода вращения $dP/dt$	$2.750(2) \times 10^{-14}$ с/с
*Регулярная вторая производная периода вращения $d^2P/dt^2$	$-2.4(1) \times 10^{-27}$ с/с <sup>2</sup>
*Магнитная индукция на полюсе	$\sim 5.1 \times 10^{13}$ Гс
*Характеристический возраст $\tau_c$	$\sim 1.36 \times 10^7$ лет
*Регулярный параметр торможения	$\sim 77$
$n = 2 - P(d^2P/dt^2)/(dP/dt)^2$	

**БЛАГОДАРНОСТИ**

Авторы выражают признательность И.Ф. Малову и Р.Д. Дагкесаманскому за прочтение рукописи, конструктивные советы и полезные замечания, способствовавшие улучшению работы. Авторы благодарят сотрудников научно-технического отдела ПРАО за надежное и качественное обеспечение радиоастрономических наблюдений, а также рецензента за высказанные замечания.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

- И. Ф. Малов *Радиопульсары* (М.: Наука, 2004).
- S. Mereghetti, J. A. Pons, and A. Melatos, *Space Sci. Rev.* **191**, 315 (2015).
- R. Turolla, S. Zane, and A. L. Watts, arXiv: astro-ph/1507.02924v1 (2015).
- F. C. Zelati, A. Borghese, G. L. Israel, N. Rea, P. Esposito, M. Pilia, M. Burgay, A. Possenti, A. Corongiu, A. Riodolfi, C. Dehman, D. Vigano, R. Turolla, S. Zane, A. Tiengo, and E. F. Keane, *Astrophys. J. Lett.* **907**, L34 (2021).
- A. A. Abdo, M. Ajello, A. Allafort, L. Baldini, J. Ballet, G. Barbiellini, M. G. Baring, D. Bastieri, A. Belfiore, R. Bellazzini, R. Bhattacharyya, E. Bissaldi, E. D. Bloom, E. Bonamente, E. Bottacini, T. J. Brandt, J. Bregeon, M. M. Brigida, P. Bruel, R. Buehier, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **208**, 17A (2013).
- J. M. Grießmeier, D. A. Smith, G. Theureau, T. J. Johnson, M. Kerr, L. Bondonneau, I. Cognard, and M. Serylak, *Astron. and Astrophys.* **654**, 14 (2021).
- A. P. Glushak, D. V. Dumsky, and B. Ya. Losovsky, *Astronomicheskii Tsirkulyar*, 1609, 1 (2014).
- A. P. Glushak, B. Ya. Losovsky, and D. V. Dumsky, *Astronomicheskii Tsirkulyar*, 1621, 1 (2015).
- M. Timirkееva, I. Malov, V. Malofeev, and O. Malov, *Open Astronomy* **30**, 119 (2021).
- A. E. Rodin, V. F. Fedorova, *Astronomy Reports* **66**, 32 (2022).
- C. M. Tan, C. G. Bassa, S. Cooper, T. J. Dijkema, P. Esposito, J. W. T. Hessels, V. I. Kondratiev, M. Kramer, D. Michilli, S. Sanidas, T. W. Shimwell, B. W. Stappers, J. van Leeuwen, I. Cognard, J. M. Grießmeier, A. Karastergiou, E. F. Keane, C. Sobey, and P. Weltewrede, *Astrophys. J.* **866**, 54 (2018).
- A. П. Глушак, *Астрон. журн.* **97**, 7, 581 (2020).
- C. A. Тюльбашев, B. C. Тюльбашев, B. B. Орешко, C. B. Логвиненко, *Астрон. журн.* **93**, 177 (2016).
- T. Enoto, S. Shibata, T. Kitaguchi, Y. Suwa, T. Uchide, H. Nishioka, S. Kisaka, T. Nakano, H. Murakami, and K. Makishima, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **231**, 21 (2017).
- J. M. Yao, R. N. Manchester, and N. Wang, *Astrophys. J.* **835**, 29 (2017).
- B. M. Малюфеев, O. И. Малов, H. B. Щеголева, *Астрон. журн.*, **77**, 499 (2000).
- A. J. Turtle and J. E. Baldwin, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **124**, 369 (1962).
- G. Younes, C.-P. Hu, K. Bansal, P. S. Ray, A. B. Pearlman, F. Kirsten, Z. Wadiasingh, E. Gogus, M. G. Baring, T. Enoto, Z. Arzoumanian, K. C. Gendreau, C. Kouveliotou, T. Guver, A. K. Harding, W. A. Majid, H. Blumer, J. W. T. Hessels, M. P. Gawronski, V. Bezrukovs, and

- A. Orbidans*, arXiv:2201.05504v1 [astro-ph. HE] 14 Jan 2022.
19. *A. B. Pearlman, W. A. Majid, and T. A. Prince*, arXiv:1902.107112v1 [astro-ph.HE] 27 Feb 2019.
  20. *C.-Y. Chu, C.-Y. Ng, A. K. H. Kong, and H.-K. Chang*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **503**, 1214, (2021).
  21. *F. Camilo, V. M. Kaspi, A. G. Lyne, R. N. Manchester, J. F. Bell, N. D'Amico, N. P. F. McKau, and F. Crawford*, Astrophys. J. **541**, 367 (2000).
  22. *M. A. Mc Laughlin, I. H. Stairs, V. M. Kaspi, D. R. Lorimer, M. Kramer, A. G. Lyne, R. N. Manchester, F. Camilo, G. Hobbs, A. Possenti, N. D'Amico, and A. J. Faulkner*, Astrophys. J. Lett. **591**, L135 (2003).
  23. *M. D. Young, R. N. Manchester, and S. Jonston*, Nature **400**, 848 (1999).
  24. *V. Morello, E. F. Keane, T. Enoto, S. Guillot, W. C. G. Ho, A. Jameson, M. Kramer, B. W. Stappers, M. Bailes, E. D. Barr, S. Bhandari, M. Caleb, C. M. L. Flynn, F. Jankowski, S. Johnston, W. van Straten, Z. Arzoumanian, S. Bogdanov, K. C. Jendreau, and C. Malacaria*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **493**, 1165 (2020).
  25. *M. Caleb, I. Heywood, K. Rajwade, M. Malenta, B. W. Stappers, E. Barr, W. Chen, V. Morello, S. Sanidas, J. van den Eijnden, M. Kramer, D. Buckley, J. Brink, S. E. Motta, P. Woudt, P. Weltewrede, F. Jankowski, M. Surnis, S. Buchner, M. C. Bezuidenhout, L. N. Dreissen, and R. Fender*, Nature Astronomy, Advanced Online Publication, arXiv:2206.01346 (2022).
  26. *N. Hurley-Walker, X. Zhang, A. Bahramian, S. J. McSweeney, T. N. D'Doherty, P. J. Hancock, J. S. Morgan, G. E. Anderson, G. H. Heald, and T. J. Galvin*, Nature **601**, 526 (2022).
  27. *K. Chen and M. Ruderman*, Astrophys. J. **402**, 264 (1993).
  28. *B. Zhang, A. K. Harding, and A. G. Muslimov*, Astrophys. J. Lett. **531**, L135 (2000).
  29. *M. A. Ruderman and P. G. Sutherland*, Astrophys. J. **196**, 51 (1975).
  30. *A. Szary, B. Shang, G. Melikidze, J. Gil, and R.-N. Xu*, Astrophys. J. **784**, 59 (2014).
  31. *И. Ф. Малов, Г. З. Мачабели* Аномальные пульсары (М.: Наука, 2009).
  32. *A. J. Turtle and J. E. Baldwin*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **124**, 459 (1962).
  33. *V. A. Izvekova, A. D. Kuzmin, V. M. Malofeev, Yu. P. Shitov*, Astrophys. Space Sci. **78**, 47 (1981).
  34. *C. N. Agar, P. Weltevrede, L. Bondonneau, J.-M. Grießmeier, J. W. T. Hessels, W. J. Huang, A. Karastergiou, M. J. Keith, V. I. Kondratiev, J. Künsemöller, D. Li, B. Peng, C. Sobey, B. W. Stappers, C. M. Tan, G. Theureau, H. G. Wang, C. M. Zhang, B. Cecconi, J. N. Girard, A. Loh, and P. Zarka*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **508**, 1102 (2021).
  35. *О. В. Дорошенко, С. М. Копейкин*, Астрон. журн. **67**, 986 (1990).