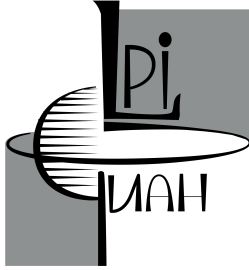


Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук «ФИАН»



На правах рукописи

Китаева Марина Анатольевна

Поиск пульсаров и вращающихся радиотранзиентов по наблюдениям на радиотелескопе БСА ФИАН

Специальность 1.3.1 —
«Физика космоса, астрономия»

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук
Тюльбашев Сергей Анатольевич

Москва — 2026

Оглавление

	Стр.
Введение	4
Глава 1. Поиск радиопульсаров	22
1.1 Радиотелескоп БСА ФИАН	22
1.2 Поиск пульсаров методом усреднения спектров мощности.	25
1.3 Поиск секундных (медленных) пульсаров по данным обзора с низким частотно-временным разрешением	40
1.4 Поиск пульсаров по данным обзора с высоким частотно-временным разрешением на склонениях $-9^\circ < \delta < +55^\circ$	62
1.5 Найденные в наших обзорах радиопульсары	76
1.6 Поиск радиоизлучения от гамма-пульсаров	79
1.7 Выводы к Главе 1	84
Глава 2. Использование поисковых данных для извлечения дрейфовых периодов пульсаров.	86
2.1 Поиск дрейфовых периодов по суммарным спектрам мощности.	86
2.2 Выводы к Главе 2	101
Глава 3. Поиск и исследование RRATs	103
3.1 Поиск RRATs	103
3.2 Поиск RRATs с использованием нейронной сети	109
3.3 Влияние межпланетных мерцаний на статистику импульсов пульсаров.	118
3.4 Выводы к Главе 3	126
Заключение	127
Список литературы	129
Приложение А. Пульсары, отмеченные на Рис. 1.15	141

Приложение Б. Список пульсаров, обнаруженных в слепом поиске.	142
Приложение В. Список не обнаруженных нами пульсаров	144
Приложение Г. Список исследуемых пульсаров	145

Введение

Радиопульсары – это быстро вращающиеся сильно намагниченные нейтронные звезды, являющиеся едва ли не самыми интересными объектами во Вселенной. Масса нейтронной звезды в разы больше, чем масса Солнца, но ее размер составляет всего лишь 10-20 км, то есть это невероятно плотные объекты. Со времени открытия пульсаров Энтони Хьюишем и его аспиранткой Джослин Белл в 1967 году [1] к настоящему времени найдено уже около 4500 этих объектов. Изучая пульсары, астрономы и физики получили и получают информацию не только о физике нейтронных звезд, но и об общей теории относительности, гравитационном потенциале и магнитном поле Галактики, межзвездной и межпланетной среде, небесной механике и так далее.

На протяжении многих лет исследования пульсаров проводились на основе многочисленных наблюдений с помощью крупных радиотелескопов. Помимо улучшения знаний о физике нейтронных звезд, эти исследования позволили обнаружить новые интересные объекты, например, пульсары в двойных системах. Часто новые открытия приводят к разработке дальнейших исследований и методов обнаружения для максимального использования имеющихся ресурсов. К настоящему времени сделано много важных открытий в области исследования нейтронных звезд.

Первым, и самым важным, конечно, является открытие первого пульсара в Кембридже [1] за которое Энтони Хьюиш получил Нобелевскую премию по физике в 1974 году. В том же 1974 году был обнаружен первый двойной пульсар В1913+16¹ [2]. Рассел Халс и Джозеф Тейлор, работавшие в обсерватории Аресибо, открыли первую двойную систему нейтронных звезд, вращающихся вокруг общего центра каждые 7.75 часа. Наблюдения показали, что система теряет энергию, так что звезды очень медленно сближаются, в точности так, как предсказывает общая теория относительности Эйнштейна. Измерение уменьшения орбиты на 1 см в сутки, связанное с этим эффектом, стало первой экспериментальной демонстрацией существования гравитационных волн. В октябре 1993 года за эту работу Халс и Тейлор получили Нобелевскую премию по физике.

¹Для наименования пульсаров сейчас используется цифро-буквенная система: цифры обозначают прямое восхождение в часах и минутах и склонение в градусах, буква "В" говорит о том, что координаты соответствуют эпохе 1950 года, после 2000 г. - "J"

В 1982 году Дональдом Бэккером с коллегами в Аресибо был обнаружен первый миллисекундный пульсар B1937+21 [3]. Период этого пульсара оказался равен 1.56 мс, он делает 641 оборот вокруг своей оси каждую секунду. В 2004 году был открыт пульсар PSR J1748-2446 [4] с частотой вращения 716 Гц., что соответствует периоду обращения 0,0013959 секунд. Одно из важных свойств миллисекундных пульсаров состоит в том, что точность, с которой они испускают импульсы, оказалась выше, чем точность хода времени у атомных часов [5]. Благодаря этому они являются настолько чувствительными зондами, что, если вокруг миллисекундного пульсара вращается даже такой малый объект, как астероид, он может быть обнаружен. Любой объект, вращающийся вокруг миллисекундного пульсара, будет вызывать периодические доплеровские сдвиги у периода испускаемых пульсаром импульсов. Проанализировав эти сдвиги, можно не только выявить наличие компаньона, но и измерить его орбиту и массу.

Эндрю Лайн с коллегами в обсерватории Джодрелл Бэнк в 1987 году обнаружили первый пульсар в шаровом скоплении M28 [6]. Авторы, сообщая об открытии пульсара с периодом обращения 3 миллисекунды в ядре шарового скопления, подчеркнули, что существование миллисекундного пульсара в таком скоплении, где наблюдаются частые взаимодействия между звездами скопления, убедительно подтверждает теорию о том, что высокая скорость вращения обусловлена аккрецией вещества на поверхность нейтронной звезды в двойной системе. Однако открытый ими пульсар является одиночным и не имеет спутника. В настоящее время известно около 150 миллисекундных пульсаров в шаровых скоплениях [7].

В 1992 году у пульсара B1257+12 были обнаружены первые планеты вне Солнечной системы [8]. Александр Вольщан, польский радиоастроном, работавший в это время в обсерватории Аресибо и изучавший им же открытый в 1990 году пульсар B1257+12, заметил, что частота прихода импульсов не постоянна. Дейл Фрейл, канадский астроном, проводивший наблюдения того же пульсара на другом телескопе, подтвердил это явление, и в 1992 году они совместно опубликовали результаты своих исследований. Они показали, что периодические изменения частоты объясняются наличием двух планет, обращающихся вокруг пульсара. Вольщан назвал их Драугр и Полтергейст. Масса второй планеты оказалась больше массы Земли в 4 раза. Позже была обнаружена еще одна планета, вращающаяся вокруг пульсара B1257+12, которая также превосходит массу Земли почти в 4 раза.

В 1993 году была открыта первая тройная система [9], состоящая из пульсара B1620-26, звезды - белого карлика PSR B1620-26B и экзопланеты массой 2.5 масс Юпитера, которая делает полный оборот вокруг двух звезд за 100 лет. Эта тройная система находится в шаровом звездном скоплении M4 в созвездии Скорпиона. Планета также была найдена по доплеровскому смещению. Группа астрономов, которую возглавлял Дональд Бейкер, вела исследования двойного, как они думали, пульсара B1620-26. Наблюдая различия в приходе импульсов от пульсара, они установили, что этой двойной системе необходим еще один объект для того, чтобы объяснить наблюдаемый эффект Доплера. Измерив гравитационные воздействия планеты на орбите двух звезд, ученые смогли оценить массу третьего тела, которая оказалась недостаточна для того, чтобы быть звездой. Стивен Торсетт с коллегами опубликовали результаты своих исследований, заключив, что третьим объектом является экзопланета [10].

В 2003 году группа астрономов, работавших в обсерватории Паркс в Австралии под руководством Марты Бургей, обнаружила двойную систему, состоящую из пульсаров [11] [12]. Радиопульсар с периодом 22.7 мс обращается вокруг радиопульсара с периодом 2.77 с со скоростью около 300 километров в секунду. Расстояние между пульсарами - почти 800 тысяч километров. Период обращения одного пульсара вокруг другого составляет всего лишь 2.4 часа - это самый маленький период из всех известных на сегодняшний день для подобных систем. Важность этого открытия заключалась в близости пульсаров друг к другу и очень малом периоде вращения, а также в том, что с Земли мы видим их с ребра - все эти обстоятельства дали возможность исследования проявлений релятивистских эффектов с большой точностью. Общая теория относительности Эйнштейна (ОТО) предсказывала, что такая система должна терять энергию за счет излучения гравитационных волн. В результате наблюдений было показано, что, в соответствии с теорией, размер орбиты системы сокращается на 7 мм ежедневно, что не только согласовалось с теорией ОТО, но и еще раз подтвердило существование гравитационных волн. Кроме того, в ходе исследования этой двойной системы был подтвержден эффект Шапиро [13], представляющий собой гравитационную задержку сигнала вследствие гравитационного замедления времени. Из-за эффекта Шапиро электромагнитные сигналы в поле тяготения распространяются дольше, чем вне этого поля. В ходе наблюдений выяснилось, что когда сигнал от дальнего от нас пульсара проходит в направлении Земли близко к ближнему к нам пульсару (вид с ребра

означает, что все три объекта, включая Землю, находятся в одной плоскости), то в результате сильного искривления пространства-времени и замедления хода времени в окрестностях ближнего пульсара этот сигнал приходит к нам позже на 90 миллисекунд.

В 2015 году астрономы из коллаборации космического гамма-телескопа «Ферми» обнаружили первый гамма-пульсар PSR J0540+6919, находящийся за пределами нашей Галактики [14]. Пульсар расположен в Большом Магеллановом Облаке, массивной галактике – спутнике нашего Млечного Пути. Среди всех известных на сегодняшний день гамма-пульсаров этот объект оказался самым ярким источником гамма-излучения. Предполагается, что это связано с его возрастом, который оценивается всего лишь в 1700 лет, тогда как возраст ранее известных гамма-пульсаров составляет от десятков тысяч до сотен миллионов лет.

В 2006 году группой астрономов в обсерватории Паркс в Австралии был обнаружен первый вращающийся радиотранзиент - RRAT (Rotating Radio Transient) [15]. RRATs являются источниками очень интенсивных и коротких вспышек в радиодиапазоне. Радиоизлучение вращающихся радиотранзиентов очень похоже на излучение пульсаров, однако, в отличие от регулярных импульсов пульсаров, RRATs проявляют себя через спорадические, нерегулярные всплески активности. Предполагается, что источником излучения вращающихся радиотранзиентов являются нейтронные звезды, обладающие исключительно мощными магнитными полями, однако причины нерегулярности вспышек остаются невыясненными. Это представляет собой актуальную проблему современной астрофизики, требующую дальнейших исследований и наблюдений.

Основными характеристиками пульсара являются период его вращения P и производная периода dP/dt , профиль среднего импульса, структура и форма импульса, поляризация и спектр, а также мера дисперсии DM (см. например [46]).

Период - это время между двумя последовательно излучаемыми пульсаром импульсами. В настоящее время минимальный известный период радиопульсара составляет 0.0014 секунд (1.4 мс), а максимальный - 76 секунд. По периоду все пульсары распределяются следующим образом: наибольшее количество так называемых нормальных пульсаров приходится на период 0.6 с, а большинство миллисекундных пульсаров имеют период около 4 мс. Произ-

водная периода пульсара - это параметр, который определяет скорость роста периода вращения пульсара. У большинства наблюдаемых пульсаров период монотонно растёт с течением времени, то есть вращение пульсара постепенно замедляется. При этом для разных типов пульсаров наблюдаются различные значения: для нормальных пульсаров типичное значение производной периода порядка 10^{-15} , а миллисекундные пульсары характеризуются существенно меньшими значениями - около 10^{-19} . Особого внимания заслуживают глитчи (от англ. glitch) - скачкообразные изменения периода вращения пульсара. Эти явления наблюдаются у некоторых пульсаров и характеризуются следующими особенностями. Они могут быть как положительными, так и отрицательными и могут значительно различаться для разных пульсаров. Например, для пульсара PSR B0531+21 наблюдались скачки периода с относительным изменением $\Delta P/P \sim 10^{-9}$. Частота возникновения глитчей для данного пульсара - несколько раз в год.

Индивидуальные импульсы радиопулсаров демонстрируют значительную непохожесть друг на друга. Однако при усреднении примерно 1000 одиночных импульсов формируется стабильный средний профиль, который не изменяется при дальнейшем увеличении количества усредняемых импульсов. Ширина импульсов в среднем профиле варьируется в диапазоне от 0,01 до 0,1 периода вращения (P). Это важный параметр, характеризующий пространственную структуру излучающей области на поверхности нейтронной звезды. Иногда в индивидуальных импульсах наблюдаются субимпульсы, имеющие симметричную форму и располагающиеся случайным образом в последовательных импульсах. Интересное явление представляет собой дрейф субимпульсов, при котором субимпульсы перемещаются от одного края среднего профиля к противоположному в последовательных импульсах. В зависимости от распределения субимпульсов форма среднего импульса может быть однокомпонентной, двухкомпонентной и многокомпонентной [16].

Иногда в промежутках между двумя последовательными импульсами пульсара, примерно посередине, встречаются небольшие импульсы, интенсивность которых составляет всего лишь несколько процентов от интенсивности главных импульсов. Такие импульсы называются интеримпульсами и встречаются у короткопериодических пульсаров, особенно часто - у миллисекундных.

У очень небольшого числа пульсаров наблюдаются быстрые вариации интенсивности в импульсах - микроструктура - на временных масштабах,

составляющих от одной до десятка микросекунд. Для того, чтобы исследовать микроструктуру, необходимы крупные радиотелескопы с очень высокой чувствительностью. Таким инструментом, например, является радиотелескоп FAST (Five-hundred-meter Aperture Spherical Telescope) в Китае. В 2025 году группой ученых, проводивших наблюдения на этом телескопе, был обнаружен пульсар PSR J1900-0134 с микроструктурными импульсами продолжительностью до 2.05 миллисекунды [17].

У небольшого числа пульсаров наблюдаются гигантские импульсы (ГИ). Они представляют собой кратковременные всплески радиоизлучения, чья пиковая плотность потока превышает средний уровень в десятки и даже тысячи раз. ГИ обладают уникальными характеристиками, которые делают их важным объектом исследований в астрофизике. Во-первых, это их высокая интенсивность. Для пульсара B0531+21 в Крабовидной туманности пиковая плотность потока ГИ может достигать 10^6 Ян. Во-вторых, очень короткая длительность. ГИ длятся от наносекунд до микросекунд. В-третьих, степенное распределение энергий. Распределение ГИ по энергиям подчиняется степенному закону с показателем $\alpha \approx -1.7 \div -3.2$, что указывает на их стохастическую природу [18]. И в-четвертых, поляризация и направленность. ГИ сильно поляризованы и излучаются в узких конусах. В работе [19] анализируются параметры пульсаров с ГИ и модели их излучения и отмечается, что ”вполне вероятно не существует единой модели для объяснения всех особенностей ГИ”.

Поляризация излучения пульсаров является ключевым параметром, позволяющим изучать их физические свойства, структуру магнитосферы и механизмы излучения. Наблюдения показывают, что излучение пульсаров в радиодиапазоне часто сильно поляризовано, с линейной поляризацией, достигающей 100% в отдельных случаях. Круговая поляризация обычно не превышает 20%, но у некоторых пульсаров может достигать 50%. Степень линейной поляризации имеет частотную зависимость: на низких частотах, менее 100 МГц, степень поляризации выше, чем на высоких. Изменение позиционного угла и степени линейной поляризации вдоль импульса позволяют определить конфигурацию магнитного поля и расположение излучающих областей [20].

Энергетический спектр пульсара - это зависимость интенсивности излучения от энергии, или частоты, испускаемых фотонов. Пульсары, в отличие от обычных звезд, имеют степенной спектр. В средних спектрах пульсаров обычно присутствуют три элемента. Это участок степенной зависимости, низ-

кочастотный завал, то есть плавное изменение спектрального индекса на низких частотах, и высокочастотный излом - резкое изменение спектрального индекса на высоких частотах. Некоторые пульсары содержат в своих спектрах циклотронные линии поглощения. Они представляют собой относительно узкие спектральные особенности, возникающие при взаимодействии излучения с электронами, которые движутся вдоль силовых линий магнитного поля. Исследование циклотронных линий поглощения в спектрах пульсаров позволяет напрямую измерять магнитные поля нейтронных звезд. Для измерения магнитных полей методом циклотронных линий поглощения используют рентгеновские спектры пульсаров. Линии образуются в результате рассеяния рентгеновских фотонов на электронах или протонах, движущихся в сверхсильных магнитных полях вблизи поверхности аккрецирующего пульсара. Обычно наблюдается только одна линия (фундаментальная). В спектре пульсара J1626.6-5156 обнаружены 4 гармонически распределенные особенности в поглощении на энергиях, кратных 4,9 кэВ [21]. Эти особенности интерпретированы как фундаментальная циклотронная линия и три её высшие гармоники, что соответствует величине магнитного поля на поверхности нейтронной звезды - 4×10^{11} Гаусс, что хорошо сочетается с теорией и законом сохранения магнитного потока.

Мера дисперсии DM (Dispersion Measure) является фундаментальной характеристикой межзвездной среды в астрофизике. Она описывает интегральное количество электронов на луче зрения от удаленного космического объекта до наблюдателя в столбе сечением 1 см^2 .

Механизм дисперсии связан с особенностями распространения электромагнитных волн в плазме. Длинные волны распространяются медленнее коротких, поэтому сигнал, испущенный одновременно на разных частотах, приходит к наблюдателю на длинных волнах позже, чем на коротких. Мера дисперсии не только дает информацию о плотности электронной составляющей межзвездной среды, но и позволяет оценить расстояние до источника излучения. Можно измерить время запаздывания сигнала на разных частотах:

$$\Delta t = \frac{2\pi e^2}{m_e c} \left(\frac{1}{\omega_1^2} - \frac{1}{\omega_2^2} \right) DM ,$$

где m_e - масса электрона, e - его заряд, c - скорость света, $\omega_{1,2}$ - измеряемые частоты.

Зная распределение электронов на луче зрения, можно определить расстояние до пульсара, поскольку

$$DM = \int_0^L n_e dl = \bar{n}_e L ,$$

где n_e - концентрация электронов на луче зрения, L - расстояние до источника.

Однако чаще всего такое распределение электронов не известно. Отсюда вытекает и обратный метод: если известно расстояние до пульсара, то можно вычислить среднюю концентрацию электронов на луче зрения. Однако метод имеет определенные ограничения. Для близких пульсаров из-за неоднородности межзвездной среды точность измерений снижается. Плотные водородные облака могут оказывать более значительное влияние на результаты, чем окружающая менее плотная среда. Для дальних пульсаров на больших расстояниях основной вклад в дисперсию вносит межоблачный газ, тогда как влияние плотных облаков становится пренебрежимо малым. Особую осторожность следует проявлять при работе с пульсарами, расположенными на значительном удалении от галактического диска (25–30 килопарсек от центра Галактики). В этих областях плотность электронного газа существенно ниже средней, что может привести к значительным искажениям в определении расстояния.

Начиная с февраля 1968 г., сразу после первой публикации об открытии пульсара, все крупные радиотелескопы, построенные за последнее десятилетие, включились в изучение этих интересных объектов. В том числе исследования начали проводиться и на Радиоастрономической станции ФИАН в г. Пущино (сейчас это Пущинская радиоастрономическая обсерватории АКЦ ФИАН). Под руководством Виткевича В.В., директора станции в то время, была организована группа сотрудников, силами которой уже через месяц после сообщения об открытии первого пульсара была создана специальная приемно-регистрирующая аппаратура и начались работы по наблюдению и изучению пульсара PSR B1919+21. Проводились эти наблюдения на широкодиапазонном крестообразном радиотелескопе ДКР-1000 [22].

В ПРАО АКЦ ФИАН, в отличие от работ зарубежных коллег, исследования проводились на более низких частотах, благодаря чему частотный диапазон изучения этих объектов был значительно расширен. Наблюдения пульсаров, проводимые в метровом диапазоне, позволили исследовать верхние области маг-

нитосферы нейтронных звезд, а также межзвездную среду нашей Галактики на основе анализа распространения импульсного излучения пульсаров.

К декабрю 1968 года всего в мире было известно 12 пульсаров. Именно в это время в Пуццинской обсерватории был открыт первый пульсар, позднее получивший наименование PSR B0943+10 [23]. Первоначально это пульсар был назван PP 0943, что означало "Пуццинский пульсар". Он стал первым пульсаром, открытым советскими астрономами.

В 1973 году для того, чтобы расширить экспериментальные возможности наблюдений, был построен новый радиотелескоп БСА ФИАН (Большая Синфазная Антенна). В настоящее время на этой антенне ведутся ежедневные мониторинговые наблюдения, результатом которых является открытие около двухсот пульсаров.

Актуальность темы.

Почти 60 лет прошло со дня открытия первого пульсара, но интерес ученых всего мира к этим объектам по-прежнему высок. Об этом говорит тот факт, что ежегодно появляется порядка тысячи публикаций, посвященных исследованиям пульсаров. Несмотря на это, очень многие вопросы по-прежнему остаются без ответов. Согласно теоретическим расчетам [24] количество радиопульсаров, доступных для обнаружения современными телескопами, оценивается как $(24 \pm 3) \cdot 10^3$, а полное число радиопульсаров в Галактике значительно больше и оценивается как $(240 \pm 30) \cdot 10^3$. В настоящее время каталог ATNF (ATNF Pulsar Catalogue) [25] насчитывает более четырех тысяч этих объектов, из них более 200 пульсаров были обнаружены в Пуццинской обсерватории, в том числе с участием автора этой диссертации. Оценки количества и расположения пульсаров имеют важное значение для понимания распределения и эволюции этих объектов в Галактике, а также для планирования будущих наблюдательных программ, направленных на обнаружение новых объектов этого класса.

Изучение пульсаров в диапазоне метровых волн представляет значительный научный интерес, поскольку позволяет глубже понять их энергетические характеристики. Это обусловлено тем, что у большинства пульсаров характерные завалы в спектрах на низких частотах проявляются примерно при частоте 100 МГц. Ключевым инструментом наших исследований выступает Большая синфазная антенна БСА ФИАН, обладающая эффективной площадью около 45 000 квадратных метров. Являясь крупнейшим в мире по эффективной площади радиотелескопом метрового диапазона, он предоставляет уникальные

возможности для изучения пульсаров и обеспечивает исключительную чувствительность наблюдений.

Отсутствие достаточного количества чувствительных радиотелескопов для наблюдений на низких частотах создает значительный пробел в исследованиях пульсаров. Благодаря использованию БСА наши исследования занимают лидирующие позиции в мировой науке.

Цель и задачи.

Основной задачей работы являлся поиск и исследование радиоизлучения от пульсаров в метровом диапазоне длин волн с целью получения новых наблюдательных данных как о механизме их радиоизлучения, так и эволюции этих объектов. В работе исследовались радиопульсары, гамма-пульсары и вращающиеся радиотранзиенты (RRAT).

Научная новизна: в диссертации получен ряд новых результатов, которые представляют собой ценность в понимании природы пульсаров.

1. Методом усреднения Фурье-спектров мощности проведен поиск пульсаров с периодами больше 0.4 с на склонениях $-9^\circ < \delta < +42^\circ$, результатом которого стало обнаружение 18-ти новых пульсаров с мерами дисперсии (DM) от 5 до 84 пк/см³. Результаты исследования опубликованы в работе А1.
2. Итогом применения новой системы калибровки 6-канальных данных на интервале 5 лет было найдено еще 5 новых пульсаров. Показано, что при поиске пульсаров методом суммирования спектров мощности на пятилетнем интервале наблюдений в зависимости от выбранного направления на небе отношение сигнала к шуму увеличивается в 10-20 раз. Результат исследования был опубликован в работе А2.
3. В проведенном обзоре в данных с низким частотно-временным разрешением методом суммирования спектров мощности и периодограмм открыто 11 новых пульсаров. Для одного из них удалось получить средний профиль. Результат исследования был опубликован в работе А3.
4. Проведен поиск пульсаров с использованием суммированных спектров мощности по данным с высоким частотно-временным разрешением. Всего зарегистрировано 332 пульсара. Из них 45 оказались новыми пульсарами. Для 8 новых пульсаров получены средние профили. Для 7 ранее обнаруженных пульсаров уточнена DM. Результат исследования был опубликован в работе А4.

5. Методом суммирования спектров мощности и суммирования периодограмм проведен поиск радиоизлучения в метровом диапазоне длин волн для пяти гамма-пульсаров. Для одного из них найдено периодическое излучение в одном сеансе наблюдений. Впервые получена верхняя оценка плотности потока на частоте 111 МГц для всех пяти гамма-пульсаров. Результат исследования был опубликован в работах А5 - А6.
6. С использованием суммированных спектров мощности проведен поиск периодов дрейфа Р2 и Р3 для 41 пульсара на склонениях $-9^\circ < \delta < +42^\circ$. Были смоделированы спектры мощности импульсов с заданным периодом, шириной импульсов и поведением дрейфа, показана применимость такого метода для оценки параметров дрейфа. Для 11 пульсаров определены или переопределены периоды дрейфа Р2. Для 8 источников определен или переопределен период дрейфа Р3, а также определено направление дрейфа субимпульсов. Результат исследования был опубликован в работе А7.
7. Проведен поиск диспергированных импульсов, в результате которого были обнаружены 12 источников импульсного излучения, являющихся известными пульсарами, и один новый RRAT (J0812+8626). Для двух пульсаров уточнена мера дисперсии. Исследования полуширин средних профилей и сильнейших импульсов обнаруженных пульсаров показали, что четыре из них могут оказаться пульсарами с гигантскими импульсами. Результат исследования был опубликован в работе А8.
8. С использованием нейронной сети проведен поиск RRAT в полугодовых мониторинговых данных на антенне БСА ФИАН, в результате которого были открыты 4 новых радиотранзиента. Использование нейронной сети показало, что с ее помощью можно уменьшить количество помех в просматриваемых данных в 80 раз, а потери реальных импульсов пульсаров не превышают 6% от их общего числа. Результат исследования был опубликован в работе А9.
9. Рассмотрено влияние межпланетной плазмы на проходящее через нее импульсное излучение пульсара. Проанализированы импульсы двух вращающихся радиотранзиентов. Показано, что при наблюдениях на частоте 111 МГц на элонгациях $20^\circ - 40^\circ$ наблюдается как увеличение, так и уменьшение количества принимаемых импульсов. Изменение количества импульсов объясняется искажением распределения энергии

импульсов из-за межпланетных мерцаний. Получены аналитические выражения, позволяющие оценить индекс мерцаний по результатам наблюдений отдельных импульсов для распределения мощности импульсов по энергиям. Результат исследования был опубликован в работе A10.

Научная и практическая значимость Все ведущие исследования пульсаров проводились на более высоких частотах, чем имеет радиотелескоп БСА ФИАН. Проведение новых низкочастотных обзоров, таких, как наш обзор, поможет разрешать существующие на сегодняшний день нерешенные задачи, такие, как более полное исследование ближней популяции пульсаров, поиск пульсаров с экстремальными свойствами, поиск новых типов этих объектов, исследование свойств у разных выборок пульсаров, а также поможет получить новые модели популяционного синтеза и другие. Результаты работы используются ведущими наблюдателями и теоретиками во всем мире, например: Han J. L., Sanidas S., Malov I.F., Malofeev V.M., Wang Chen, Tan C.M., Cooper S., Bassa C. G.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. С использованием разработанных методов обработки данных проведен поиск пульсаров. Результатом поиска является открытие 79 новых пульсаров. Также найдено периодическое радиоизлучение для гамма-пульсара J0357+3205 и дана верхняя оценка интегральной плотности потока на частоте 111 МГц для пяти гамма-пульсаров.
2. Определен период P2 для 11 пульсаров. Направление дрейфа и значение P3 получено для 7 пульсаров.
3. Впервые проведен поиск RRAT с помощью нейронной сети на склонениях от -9° до $+42^\circ$. Обнаружены 4 новых радиотранзиента. Показано, что использование нейронной сети позволяет уменьшить количество помех в просматриваемых данных в 80 раз. Проведен поиск диспергированных импульсов на склонениях от $+55^\circ$ до $+87^\circ$, обнаружены 12 источников импульсного излучения, являющихся известными пульсарами, и один новый RRAT (J0812+8626). Для двух пульсаров уточнена мера дисперсии.
4. Рассмотрено влияние межпланетной плазмы на проходящее через нее импульсное излучение пульсара. Проанализированы импульсы двух вращающихся радиотранзиентов. Показано, что при наблюдениях на частоте 111 МГц на элонгациях $20^\circ - 40^\circ$ наблюдается как увеличение,

так и уменьшение количества принимаемых импульсов. Изменение количества импульсов объясняется искажением распределения энергии импульсов из-за межпланетных мерцаний.

Достоверность результатов. Результаты, представленные в диссертации, были получены с использованием известных в мире и апробированных методов наблюдений и обработки данных. Часть обнаруженных нами новых пульсаров подтверждена на других крупнейших радиотелескопах (LOFAR, MWA, FAST и др.)

Регистрация радиоизлучения от гамма-пульсара J0357+3205 с характеристиками, близкими к характеристикам, полученным в работах других авторов на разных частотах [26–28], подтверждает, что наши методы регистрации и обработки наблюдений, как и наши инструменты, способны составить конкуренцию ведущим исследователям.

На опубликованные работы на сегодняшний день имеется более ста положительных ссылок в ведущих журналах, включая зарубежные, например:

- Andrade, Christopher et.al., 2025, *The Astrophysical Journal*, Volume 990, Issue 1, id.50, 22 pp.;
- Han, J. L. et.al., 2025, *Research in Astronomy and Astrophysics*, Volume 25, Issue 1, id.014001, 56 pp.;
- Ridnaia, A. et.al., 2024, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 527, Issue 3, pp.5580-5587;
- van der Wateren, E. et.al., 2023, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 669, id.A160, 16 pp.;
- Kontar, Eduard P. et.al., 2023, *The Astrophysical Journal*, Volume 956, Issue 2, id.112, 20 pp.;
- McKenna, D. J. et.al., 2024, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 527, Issue 3, pp.4397-4419;
- Tanashkin, A. S. et.al., 2022, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 516, Issue 1, pp.13-25;
- Malofeev, V. M. et.al., 2022, *Research in Astronomy and Astrophysics*, Volume 22, Issue 3, id.035010, 12 pp.;
- Teplykh, D. et.al., 2020, *Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century*, Proceedings of the All-Russian Conference held 21-25 September, 2020, p. 446-450;
- Zhao, Rushuang et.al., 2023, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 521, Issue 2, pp.2298-2325;

Xu, Jun et.al., 2022, Science China Physics, Mechanics & Astronomy, Volume 65, Issue 12, article id.129704;

Perera, B. V. P. et.al., 2022, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 509, Issue 2, pp.1929-1939

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на следующих Всероссийских и Международных конференциях:

1. Всероссийская конференция "Физика звёзд в эпоху многоволновых наблюдений" (Санкт-Петербург, сентябрь 2025 г.)

2. Всероссийская конференция "Современная астрономия: от ранней Вселенной до экзопланет и черных дыр" (п. Нижний Архыз, САО РАН, август 2024 г.)

3. Всероссийская конференция "Физика нейтронных звёзд" (Санкт-Петербург, июль 2023 г.)

4. Всероссийская конференция "Наземная астрономия в России. XXI век" (п. Нижний Архыз, САО РАН, сентябрь 2020 г.)

5. Всероссийская астрофизическая конференция "Астрофизика высоких энергий" (Москва, ИКИ, декабрь 2018 г.)

6. Всероссийская астрономическая конференция–2017 "Астрономия: познание без границ" (Ялта, сентябрь 2017 г.)

Личный вклад.

Вклад автора является основным в следующих результатах, вынесенных на защиту: вычисление периодов и мер дисперсий пульсаров, вычисление плотностей потока пульсаров, визуальный поиск пульсаров и радиотранзиентов. Анализ и интерпретация полученных результатов совместно с руководителем и другими соавторами делался в равных долях. Текст статей в части, касающейся наблюдений, делался автором самостоятельно. Большая часть рисунков, графиков и гистограмм в работах подготовлены автором самостоятельно.

Публикации. Все результаты диссертационной работы опубликованы в рецензируемых журналах и сборниках трудов научных конференций. Всего опубликовано 14 научных работ [А1-А10, Б1-Б4], включая тезисы докладов научных конференций [Б1-Б4]. Основные результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, изложены в 10 статьях [А1-А10] в рецензируемых журналах, входящих в международные базы цитирования Web of science и удовлетворяющие требованиям ВАК.

А1. Тюльбашев С.А., Тюльбашев В.С., Китаева М.А. и др. Поиск и обнаружение пульсаров в мониторинговых наблюдениях на частоте 111 МГц. // *Астрономический журнал* — 2017. — Vol. 94, № 10. — Р. 837-848

А2. Тюльбашев С.А., Китаева М.А., Тюльбашев В.С. Обнаружение пяти новых пульсаров на радиотелескопе БСА ФИАН. // *Астрономический журнал* — 2020. — Vol. 64, № 6. — Р. 526-532

А3. Tyul'bashev S.A., Kitaeva M.A., Tyul'basheva G.E. Pushchino multibeam pulsar search I. Targeted search of weak pulsars. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* — 2022. — Vol. 517, № 1. — Р. 1112–1125

А4. Tyul'bashev S.A., Tyul'basheva G.E., Kitaeva M.A. et. al. Pushchino multibeam pulsar search IV. Detection of new pulsars at declinations $-9^\circ < \delta < 55^\circ$. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* — 2024. — Vol. 528, № 2. — Р. 2220–2231

А5. Тюльбашев С.А., Китаева М.А. Поиск периодического радиоизлучения гамма пульсара J0357+3205 в индивидуальных записях на частоте 111 МГц. // *Краткие сообщения по физике Физического института им. П.Н. Лебедева Российской Академии Наук* — 2019. — № 7. — Р. 21-25

А6. Тюльбашев С.А., Китаева М.А., Тюльбашева Г.Э. Поиск периодического излучения у пяти гамма-пульсаров на частоте 111 МГц. // *Астрономический журнал* — 2021. — Vol. 98, № 10. — Р. 849-855

A7. *Smirnova T.V., Tyul'bashev S.A., Kitaeva M.A., Malofeev V.M.* Pushchino multibeam pulsar search III. Drift periods of pulsars from summed power spectra method. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* — 2024. — Vol. 528, № 1. — P. 726–734

A8. *Тюльбашев С.А., Китаева М.А., Логвиненко С.В., Тюльбашева Г.Э.* Поиск диспергированных импульсов на склонениях от $+56^\circ$ до $+87^\circ$. // *Астрономический журнал* — 2021. — Vol. 98, № 12. — P. 1010-1018

A9. *Tyul'bashev S.A., Pervukhin D.V., Kitaeva M.A., Tyul'basheva G.E.* Revisiting the Pushchino RRAT search using a neural network. // *Astronomy and Astrophysics* — 2022. — Vol. 664 — P. A37

A10. *Tyul'bashev S.A., Chashei I.V., Kitaeva M.A.* Interplanetary scintillation and pulsar pulse statistics. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* — 2023. — Vol. 523, № 1. — P. 1389–1393

Б1. *Тимуржеева М.А., Тюльбашев С. А., Китаева М.А. и др.* Наблюдения пульсаров в ПРАО. // Тезисы докладов конференции "Физика звёзд в эпоху многоволновых наблюдений" — Санкт-Петербург, 2025 — С.

Б2. *Китаева М.А., Тюльбашев С. А., Чашей И. В.* Влияние межпланетной плазмы на поиск импульсных диспергированных сигналов. // Тезисы докладов конференции "Физика нейтронных звёзд" — Санкт-Петербург, 2023 — С. 27

Б3. *Tyul'bashev S.A., Tyul'basheva G.E., Kitaeva M.A.* Pushchino multibeam pulsar search: First results. // *The Multifaceted Universe: Theory and Observations - 2000*. — 2022. — P. 43

Б4. *Tyul'bashev S.A., Kitaeva M.A., Tyul'basheva G.E.* Search for Periodic Emission from a Few Gamma-Ray Pulsars at 111 MHz. // *Proceedings of the All-Russian Conference "Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century – Nizhny Arkhyz, SAO RAS* — 2020. — P. 474-476

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и четырех приложений. Полный объем диссертации составляет 145 страниц, включая 38 рисунков и 13 таблиц. Список литературы содержит 121 наименование.

Во **Введении** кратко изложена история открытия и начала исследования радиопульсаров. Рассмотрены основополагающие работы в развитии теоретических представлений о природе пульсаров. Обоснована актуальность темы диссертации, представлены основные цели работы, научная новизна, практическая значимость и результаты, выносимые на защиту.

Глава 1 посвящена поиску радиопульсаров на радиотелескопе БСА ФИАН на частоте 111 МГц. Подробно описано, какие методы использовались для поиска пульсаров. Всего было обнаружено 79 новых пульсаров. Показано, что ожидаемая (теоретическая) чувствительность проводимого нами обзора с суммированием спектров мощности и периодограмм при использовании 32-канальных данных и времени опроса 12.5 мс на одну точку сырых данных примерно на порядок превосходит чувствительности всех проведенных ранее и текущих обзоров, за исключением обзора GPPS, проводимого на 500-метровом телескопе FAST. Дана верхняя оценка интегральной плотности потока для пяти гамма-пульсаров.

Глава 2 посвящена изучению дрейфового поведения импульсов пульсаров. Для поиска периодов дрейфа были рассмотрены суммарные спектры мощности известных пульсаров, полученные нами в результате обработки данных мониторинга. Наш анализ показал, что дрейфовое поведение не было обнаружено для большинства исследованных пульсаров. Распределение амплитуд основных гармоник во многих случаях не отличается от их распределения без наличия дрейфа. Суммарные спектры мощности пульсаров при наличии дрейфа также хорошо описываются предложенной моделью.

Глава 3 посвящена поиску и исследованию характеристик RRAT и исследованию влияния межпланетной среды на излучение пульсаров. Рассмотрены три проявления межпланетных мерцаний на статистике наблюдаемых импульсов пульсаров: изменение количества наблюдаемых импульсов, искажение распределения количества импульсов по энергии, зависимость индекса мерцания от наблюдаемой элонгации. Получены аналитические выражения, позволяющие оценить индекс мерцаний.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

В **Приложениях** перечислены пульсары, отмеченные на Рис. 14 из параграфа 3 Главы 1; список известных ATNF пульсаров, обнаруженных в обзоре в слепом поиске; список ATNF пульсаров, которые не детектированы в нашем обзоре в площадке $+21^\circ < \delta < +42^\circ$; Список 41 исследованного пульсара при поиске периодов P2 и P3.

Глава 1. Поиск радиопульсаров

1.1 Радиотелескоп БСА ФИАН

Радиотелескоп меридианного типа БСА ФИАН был создан и начал работать в Пуцзинской радиоастрономической обсерватории в 1974 году (Рис. 1.1). Основной его задачей было исследование радиоизлучения различных космических объектов в метровом диапазоне радиоволн. Приёмная антенна радиотелескопа является фазированной антенной решёткой, которая тянется с востока на запад на 187 метров и с севера на юг на 384 метра. В её состав входят 256 линейных антенн, ориентированных в направлении восток-запад. Каждая из этих антенн оснащена 64 волновыми диполями. Расстояние между соседними линейными антеннами в направлении север-юг составляет 1,5 метра. Сигналы от каждой линейной антенны усиливаются с помощью 256 отдельных антенных усилителей, затем усиленные сигналы поступают в систему, формирующую многолучевую диаграмму направленности.



Рисунок 1.1 — Радиотелескоп БСА ФИАН. Рисунок взят с сайта ПРАО АКЦ ФИАН.

Позднее технические характеристики радиотелескопа претерпели некоторые изменения. Изначально центральная частота приёма составляла 102,5 МГц

(длина волны 2,9 метра). В середине 1990-х годов антенна была модернизирована и переведена на частоту 111 МГц (длина волны 2,7 метра). Система усилителей и фильтров обеспечивает анализ сигнала в полосе частот 2,5 МГц вокруг центральной частоты.

Лучи диаграммы направленности располагаются в меридианной плоскости. На частоте 111 МГц их размеры по уровню половинной мощности составляют 44 угловые минуты по прямому восхождению и 21,5 угловой минуты, умноженной на $\sec Z$, по склонению, где Z представляет собой зенитное расстояние: $Z = | \varphi - \delta |$, δ - склонение максимума луча, а φ — широта расположения радиотелескопа. Расстояние между максимумами соседних лучей по склонению равно $24' * \sec Z$.

До 2012 года радиотелескоп БСА ФИАН имел 16-лучевую диаграмму направленности, которой можно было управлять. Это позволяло одновременно принимать сигналы из 16 различных направлений, охватывающих интервал склонений шириной $6,5^\circ \times \sec Z$. Благодаря возможности изменения положения этой диаграммы, телескоп способен один раз в сутки наблюдать любой космический объект, имеющий склонение в диапазоне от -20° до $+90^\circ$.

Для того чтобы совершить прорыв в изучении космических объектов в радиодиапазоне, требовалось значительно улучшить характеристики существующего радиотелескопа БСА ФИАН [29]. Прежде всего, необходимо было добиться существенного роста чувствительности антенны и расширения ее поля зрения. Реализация этих целей оказалась возможной лишь после комплексной модернизации всей системы. Была проведена глубокая реконструкция антенно-фидерного тракта и внедрена усовершенствованная технология формирования многолучевой диаграммы направленности. В период с 2009 по 2012 год специалисты обсерватории успешно реализовали масштабный проект по обновлению оборудования. Ключевыми элементами модернизации стали разработка автономной системы формирования многолучевых диаграмм и создание современного цифрового комплекса для приёма и регистрации сигналов по нескольким каналам одновременно. Результатом проведённых работ стал фактически новый радиотелескоп, чьи технические возможности существенно превосходили предшествующую модель. Значительно возросла чувствительность радиотелескопа, а диаграмма направленности стала включать в себя 128 лучей, расположенных в меридианной плоскости.

Радиотелескоп БСА ФИАН состоит из 16384 полуволновых диполей. Используя антенное поле и размножение сигналов на входе в кабельную систему, в 2012 году удалось создать четыре независимых системы лучей на основе матриц Батлера [29], то есть реализовать техническую возможность создания четырех радиотелескопов на базе одного антенного поля.

БСА1, первый из них, это радиотелескоп с 512 лучами диаграммы направленности, он имеет эффективную площадь 38 000 м² в направлении на зенит. Для БСА1 разработан специальный регистратор, который позволяет записывать наблюдения в восьми лучах, которые выстроены в меридианной плоскости. Наблюдения на этом инструменте проводятся на склонениях от -20° до +88°. В основном на радиотелескопе БСА1 проводят исследования пульсаров в однолучевом режиме, при этом используются специализированные под пульсарные наблюдения радиометры. Соседние лучи на БСА1 перекрываются на уровне 0.81, то есть если источник попадает ровно между лучами, то в каждом из соседних лучей наблюдается 0.81 от его полной энергии. Как отмечалось ранее, на БСА1 можно наблюдать источники со склонениями от -20° до +88°, но на самом деле отрицательные склонения редко используются, потому что чем ниже склонение, тем уровень помех от таких крупных городов, как Москва и Тула, больше. Эти города расположены примерно в 100 километрах от Пущино, первый – севернее, а второй - южнее. Кроме того, эффективная площадь антенны уменьшается с понижением склонения источников, например, для источника со склонением $\delta = -5^\circ$ эффективная площадь антенны БСА1 будет ниже в два раза.

Второй радиотелескоп, БСА3, имеет 128 лучей диаграммы направленности. Его эффективная площадь в направлении на зенит составляет примерно 45 000 м². Лучи диаграммы этой антенны пересекаются на уровне 0.4, доступные для наблюдений склонения простираются от -9° до +55°. Конфигурация системы регистрации претерпела изменения в начале 2021 года. До этого момента функционировали два регистратора, к которым было подключено 96 из 128 доступных лучей. В январе 2021 года система расширилась за счёт третьего регистратора, который начал обрабатывать дополнительные 32 луча. Размер одного луча БСА3 составляет примерно 0.5° * 1°. При наблюдении на нулевом склонении ($\delta = 0^\circ$) продолжительность сеанса наблюдений по половинной мощности составляет около 3,5 минут. Длительность сеанса наблюдений увеличивается пропорционально $\cos(\delta)$. Этот фактор особенно важен при работе с объектами, имеющими большие склонения. Частотные параметры антенны

включают центральную частоту наблюдений 110,3 МГц и полосу пропускания 2,5 МГц.

На антенне БСАЗ ежедневно ведется обзор неба, который в дальнейшем используется для различных научных задач, в том числе и для поиска пульсаров и транзиентов. Данные, поступающие с БСАЗ, записываются параллельно в двух режимах. В первом из них, 6-ти канальном, записываются данные с низким частотно-временным разрешением. При этом время опроса, Δt , составляет 0.1с, и ширина канала - $\Delta \nu = 430$ кГц. Во втором, 32-канальном режиме, записываются данные с высоким частотно-временным разрешением. В этом режиме используются параметры $\Delta \nu = 78$ кГц и $\Delta t = 12.5$ мс. Далее по тексту данные с низким частотно-временным разрешением будем называть "короткие данные" а с высоким частотно-временным разрешением - "длинные данные".

В настоящее время на третьем радиотелескопе ведутся работы по обновлению оборудования. Результатом модернизации станет создание 512-лучевой антенны, которая по своей эффективной площади будет сопоставима с параметрами БСАЗ. Параллельно с этими работами на четвёртом радиотелескопе проводятся тестовые испытания, направленные на совершенствование антенной системы, в ходе которых научные наблюдения по утверждённым программам продолжают без перерывов.

Основой регистрирующей системы является базовый модуль, представляющий собой печатную плату с установленными на ней электронными компонентами. Центральным элементом в модуле является микросхема FPGA (field-programmable gate array). Именно объем ресурсов FPGA и быстродействие этих ресурсов определяют максимально возможное частотно-временное разрешение регистратора в целом. Каждая FPGA параллельно обрабатывает потоки данных, поступающие от 8 АЦП, с общей скоростью потока 2.76 ТБ в секунду. В этом случае используются около 80% возможностей FPGA. Выходной поток данных, записываемых на жесткие диски со всех трех регистраторов, составляет 4.65 ГБ в час и 39.8 ТБ в год. Детальное описание регистраторов рассмотрено в работе [30].

1.2 Поиск пульсаров методом усреднения спектров мощности.

За последние 10-15 лет во всем мире было проведено несколько обзоров, посвященных поиску новых пульсаров. Работы эти проводились на крупнейших радиотелескопах. Обзор NHTRU был выполнен на 100-метровом радиотелеско-

пе в Эффельсберге [31], обзор NTRU - на 64-метровом радиотелескопе в Парксе [32], оба на частоте 1.4 ГГц. Обзор GBNCSS был проведен на частоте 350 МГц на 100-метровом радиотелескопе в Грин-Бэнк [33], а обзор AO327 - на частоте 327 МГц на 300-метровом радиотелескопе в Аресибо [34]. Еще два обзора, LPPS и LOTAAS, были проведены на частоте 142 МГц, с использованием системы апертурного синтеза LOFAR [35]. Все перечисленные обзоры были выполнены на лучших радиотелескопах мира, приемная аппаратура которых, а также частота и полоса наблюдений и постоянная времени были подобраны таким образом, чтобы максимально соответствовать задаче поиска новых пульсаров и при этом обеспечивать соответствующую чувствительность проводимым наблюдениям. И несмотря на то, что обзоры выполнялись в тех площадках, которые были обработаны ранее, и неоднократно, новые пульсары все равно удается находить как в новых наблюдениях, так и в ранее просмотренных архивных данных. Объяснить это можно несколькими причинами. Прежде всего, постепенно появляются новые, усовершенствованные цифровые приемники, которые способны охватывать значительно более широкие диапазоны частот, что существенно повышает точность и чувствительность наблюдений по сравнению с предыдущими исследованиями. Кроме того, постоянно совершенствуются методы обработки полученных данных, благодаря чему стало возможным заново анализировать архивные материалы и находить в них ранее незамеченные пульсары.

Антенна БСА ФИАН также является эффективным инструментом для поиска пульсаров. Главным преимуществом наблюдений на радиотелескопе БСА ФИАН, в отличие от всех перечисленных выше обзоров, является длительный и регулярный мониторинг, то есть ежедневные наблюдения в течение нескольких лет, начиная с 2013 года. Это преимущество было использовано нами в первых работах по поиску новых радиопульсаров.

Для поиска была написана специальная программа обработки и визуализации данных BSA-Analytics (<https://github.com/vtyulb/BSA-analytics>). Создана она на языке Qt/C++ под лицензией GPL V3.01. Программа состоит из двух частей. Первая часть осуществляет сложение периодов источников, перебирая меры дисперсии, и записывает в специальный каталог все периодические сигналы с отношением сигнала/шум (СШ или S/N) от 4, которые были обнаружены. Вторая часть программы предназначена для анализа этих сигналов и позволяет провести сравнительный анализ данных за любой период обработки по различным критериям и применить дополнительные инструменты фильтрации. Кроме

того, что программа позволяет провести мониторинг стабильности периодических сигналов в течение нескольких дней подряд, она также предоставляет возможность проанализировать совпадения пиковых значений накопленных импульсов пульсаров с двойным периодом. Более подробное описание функционала программы можно посмотреть в работе [36].

Известно, что если пульсар демонстрирует стабильную плотность потока, то есть ни собственной переменности, ни связанных с межзвёздной средой вариаций он не имеет, и при этом его период и производная периода определены с высокой точностью, даже если эти данные получены на других частотах, то появляется хороший шанс существенно улучшить качество наблюдений. Суть этого метода заключается в том, что путём накопления импульсов во время всех наблюдательных сессий можно значительно повысить отношение сигнал/шум. Увеличение происходит пропорционально квадратному корню от общего числа накопленных импульсов. Благодаря этому становится возможным обнаружение даже очень слабых пульсаров, которые невозможно выявить при кратковременных наблюдениях. Но данный метод неприменим в случаях, когда пульсар ранее не изучался или его период определён недостаточно точно. В таких ситуациях невозможно корректно учитывать изменения во времени прихода фазы импульса. Поэтому при первичном поиске слабых пульсаров в рамках мониторинговых наблюдений необходимо использовать специальную методику. Эта методика должна обеспечивать выявление потенциальных кандидатов в слабые пульсары и независимость от ежедневного определения фазы прихода импульса.

Такая методика была применена и заключалась она в поиске гармоник в Фурье-спектрах мощности пульсаров [37]. Спектры мощности строились на временных интервалах в 2048 точек, что соответствует 3,5 минутам записи данных. Чтобы увеличить чувствительность, далее производилось сложение спектров, которые соответствовали одному и тому же звездному времени, за весь период наблюдений. Информация о фазе прихода импульса в спектре мощности отсутствует, но для гармоник, кратных периоду пульсара, отношение сигнал/шум при сложении записей растёт. При условии стабильности плотности потока излучения пульсара на протяжении длительного периода и минимальных изменениях усиления радиометров обработка данных наблюдений за четырёхлетний период позволит улучшить отношение СШ приблизительно в три десятка раз. Поэтому, если учитывать теоретическую оценку чувствительности проводимых на радиотелескопе БСА ФИАН наблюдений, которая была сделана в работе [36],

можно предполагать, что на этой антенне мы получим чувствительность 0.2 мЯн для пульсаров, находящихся вне плоскости Галактики, и 0.6 мЯн для пульсаров в плоскости Галактики. На практике, как описано в этой же работе, чувствительность наблюдений получается в три раза хуже ожидаемой. И тем не менее она остается выше, чем чувствительность других обзоров, посвященных поиску пульсаров, если учитывать, что в диапазоне частот от 102 до 400 МГц средний спектральный индекс спектра пульсаров α примерно равняется 1.35: $S \sim \nu^{-\alpha}$

При поиске пульсаров по усредненным спектрам мощности, особенно если учитывать, что в индивидуальных записях слабые пульсары не видны, мы использовали следующие критерии:

- Регулярность сигнала, то есть его повторяемость в соответствии со звёздным временем.
- Наличие явного пика при анализе связи между отношением СШ и мерой дисперсии. Для этого в аналитическую часть программы был добавлен специальный модуль, суммирующий подобные зависимости.
- Присутствие как минимум двух гармоник в спектре мощности. Данное требование автоматически исключает из поиска пульсары с периодом менее 400 миллисекунд.
- Подтверждение обнаружения в 32-канальном частотном режиме наблюдений – необходимо наличие хотя бы одной записи среднего профиля с отношением СШ больше 6. Важно, чтобы при регистрации с двойным периодом высота средних профилей оставалась одинаковой.

В ходе поиска удалось найти 131 пульсар, из них 18 пульсаров соответствовали перечисленным выше критериям и были обнаружены впервые. В качестве примера на рисунке 1.2 показаны Фурье-спектры мощности трех пульсаров, зарегистрированных в этом обзоре. Первый из них, пульсар J0611+30, представленный на рисунке 1.2а, был открыт на телескопе в Аресибо [38]. Его период составляет $P_{ATNF} = 1.412090$ с и известен лишь до 6-го знака, то есть этот пульсар мало изучен. На рисунке видны более слабые гармоники между сильными гармониками пульсара. Эти слабые гармоники представляют собой помеху, которая наблюдается в отдельных лучах БСА ФИАН. На рисунке 1.2б показан спектр мощности сильного пульсара J0928+30, открытого ранее на БСА ФИАН [36]. В спектре мощности видны основные гармоники пульсара и его некратные гармоники, а также помеха, которая присутствует и на рисунке 1.2а.

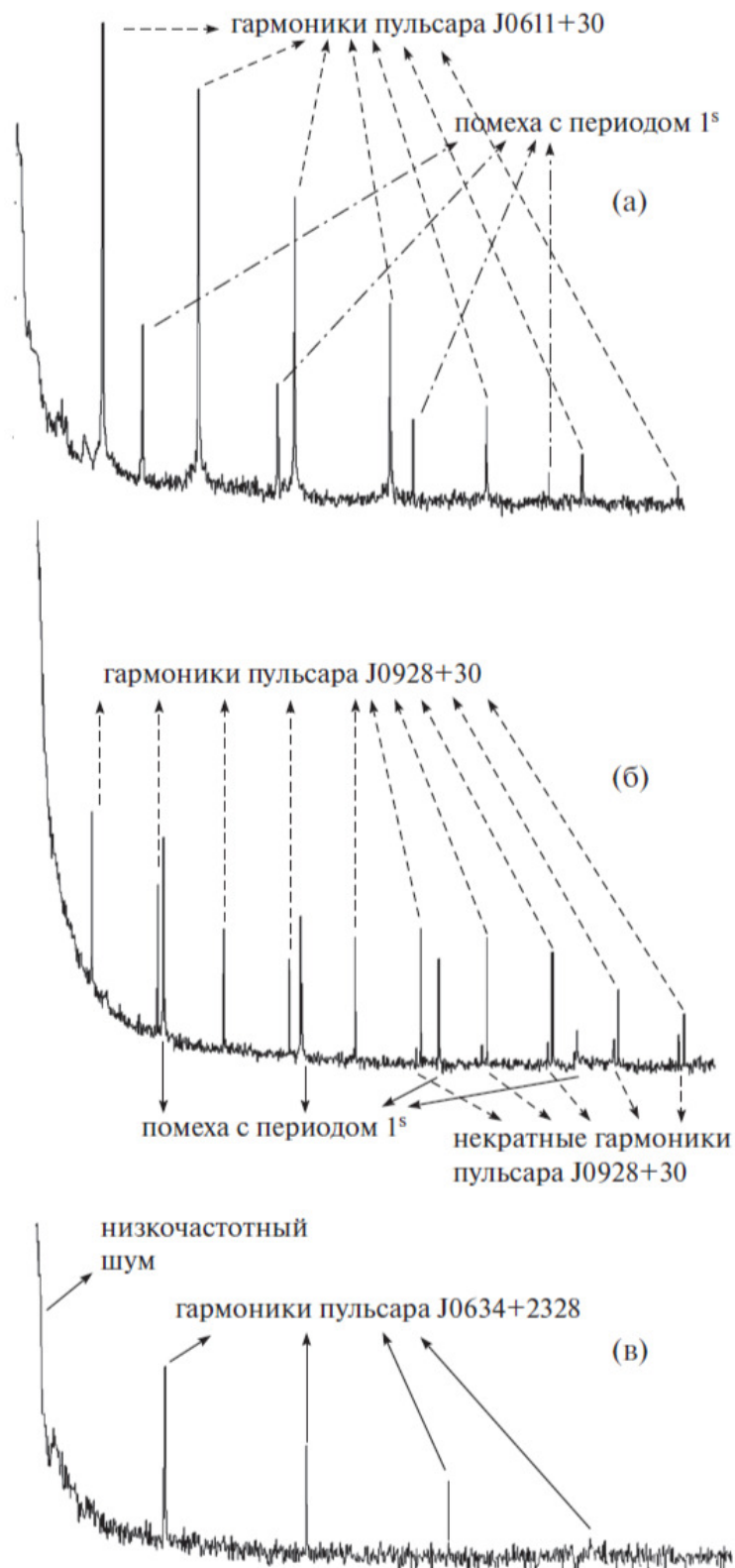


Рисунок 1.2 — Фурье-спектры мощности трех пульсаров, детектированных в обзоре. Рисунок взят из [37].

На рисунке 1.2в представлен спектр мощности одного из новых пульсаров, обнаруженных в данном обзоре. Это слабый пульсар J1634+2328 с периодом 1.2087 с. Как говорилось ранее, периодическая помеха с периодом 0.9981 с наблюдается не во всех лучах БСА, и на рисунке 1.2в она отсутствует.

Все новые пульсары, найденные в обзоре, по наблюдаемой интенсивности излучения условно можно поделить на три типа. К первому типу можно отнести настолько сильные пульсары, что для каждого из них в 32-частотных данных были найдены такие индивидуальные записи, по которым удалось построить и зависимость сигнал/шум от меры дисперсии, и динамические спектры, и средние профили пульсаров с двойным периодом. Ко второму типу относятся пульсары, для которых по индивидуальным записям были получены только средние профили и зависимости сигнал/шум от меры дисперсии, но не получены динамические спектры. И к третьему типу относятся слабые пульсары, у которых были найдены индивидуальные записи только в 6-частотных данных и найдено лишь по одной записи в 32-частотных данных. По всей видимости чувствительность радиотелескопа БСА ФИАН в отдельных сеансах наблюдений недостаточна для того, чтобы уверенно находить такие слабые пульсары.

На рисунках 1.3 и 1.4 представлены все 18 новых пульсаров. На рисунке 1.3 для наиболее сильных из них показаны средние профили с двойным периодом, а также динамические спектры для двойного периода за лучший день из всех найденных. Частоты на динамических спектрах увеличиваются сверху вниз. В некоторых динамических спектрах произведено сглаживание скользящим средним для того, чтобы увеличить контраст. На рисунке 1.4 показаны средние профили с двойным периодом для пульсаров условно введенного нами второго и третьего типа, то есть средних и слабых пульсаров, для которых не удалось построить динамические спектры. Из-за того, что чувствительность БСА в разных направлениях на небе неравномерна, плотности потока от двух одинаковых радиоисточников, наблюдающихся на склонениях, различающихся всего на несколько градусов, могут отличаться в несколько раз [29]. Поэтому в наблюдениях на других радиотелескопах тот пульсар, который оказался "слабым" у нас, может оказаться "средним" и даже достаточно "сильным".

В Таблице 1 показаны характеристики нескольких новых пульсаров (полную таблицу можно посмотреть в параграфе 5 первой главы). Первый столбец - это наименования пульсаров на эпоху 2000 года. Во 2 и 3 столбцах приведены прямое восхождение и склонение также на эпоху 2000 года. Прямое восхождение

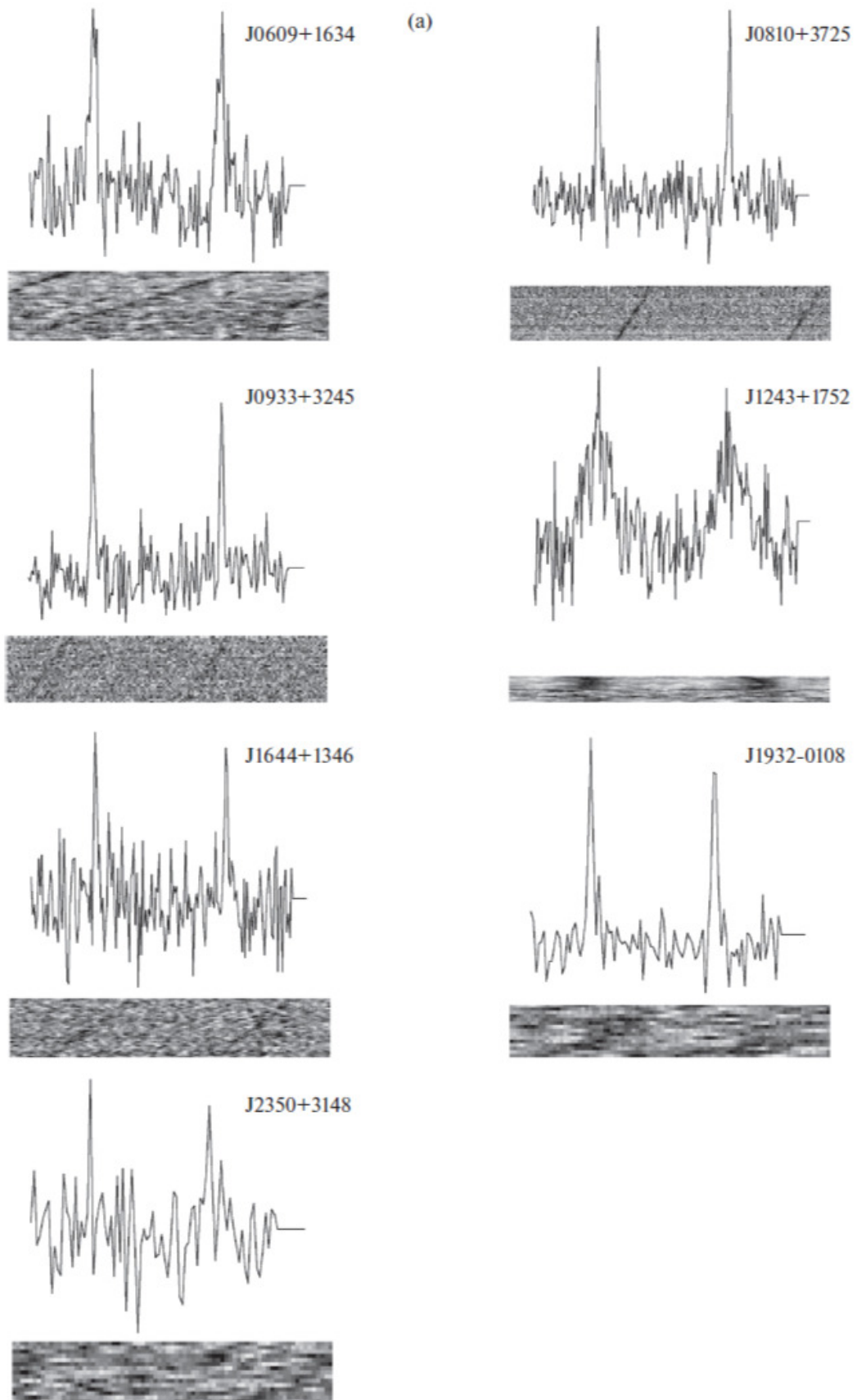


Рисунок 1.3 — Динамические спектры и средние профили с двойным периодом для обнаруженных сильных пульсаров. Рисунок взят из [37].

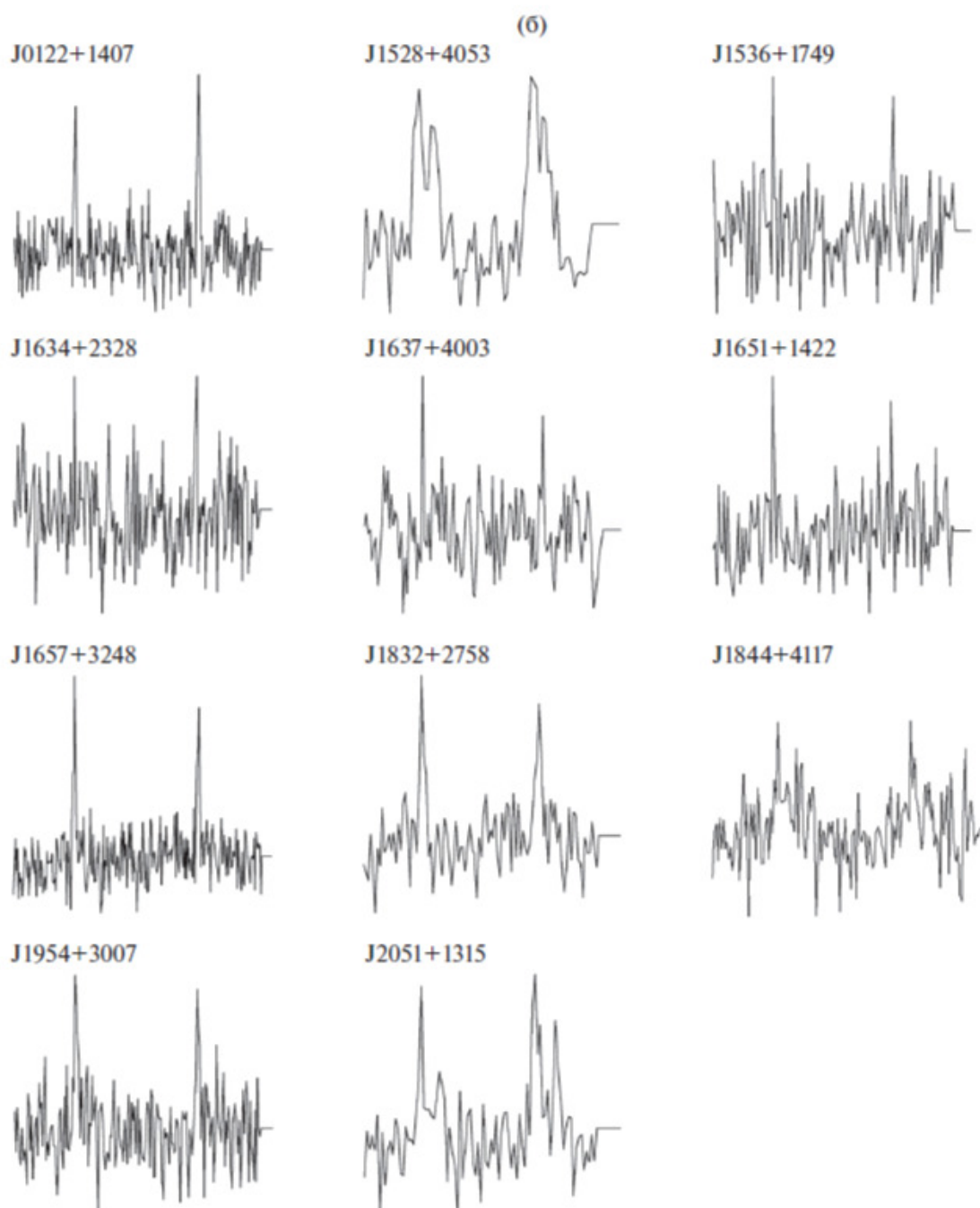


Рисунок 1.4 — Средние профили с двойным периодом для обнаруженных средних и слабых пульсаров. Рисунок взят из [37].

Таблица 1 — Характеристики новых пульсаров

Имя	α_{2000}	δ_{2000}	P (сек)	DM (пк/см ³)	$W_{0.5}$ (мс)	вм
J0122+1407	01 ^h 22 ^m 07 ^s	+14° 07'	1.3885	18±2	30	2
J0609+1634	06 ^h 09 ^m 13 ^s	+16° 34'	0.9458	84±5	45	1
J0810+3725	08 ^h 10 ^m 30 ^s	+37° 25'	1.2483	16±2	35	1
J0933+3245	09 ^h 33 ^m 50 ^s	+32° 45'	0.9616	18±3	30	1
J1243+1752	12 ^h 43 ^m 00 ^s	+17° 52'	1.2165	5±3	200	1
J1528+4053	15 ^h 28 ^m 00 ^s	+40° 53'	0.4764	6±2	110	2
J1536+1749	15 ^h 36 ^m 15 ^s	+17° 49'	0.9333	28±3	20	3
J1634+2328	16 ^h 34 ^m 50 ^s	+23° 28'	1.2087	36±4	40	2
J1637+4003	16 ^h 37 ^m 30 ^s	+40° 03'	0.7675	31±4	35	3
J1644+1346	16 ^h 44 ^m 15 ^s	+13° 46'	1.0989	34±1.5	20	1
J1651+1422	16 ^h 51 ^m 00 ^s	+14° 22'	0.8280	48±10	-	3
J1657+3248	16 ^h 57 ^m 30 ^s	+32° 48'	1.5702	23±2	45	2
J1832+2758	18 ^h 32 ^m 10 ^s	+27° 58'	0.6318	46±3	30	2
J1844+4117	18 ^h 44 ^m 45 ^s	+41° 17'	0.9157	50±10	300	3
J1932-0108	19 ^h 32 ^m 15 ^s	-01° 08'	0.5937	35.5±1.5	25	1
J1954+3007	19 ^h 54 ^m 00 ^s	+30° 07'	1.2710	42±2	35	2
J2051+1315	20 ^h 51 ^m 30 ^s	+13° 15'	0.5532	42.5±2.5	120	2
J2350+3148	23 ^h 50 ^m 10 ^s	+31° 48'	0.5081	37.5±2.5	15	1

определено с точностью $\pm 1^m$, склонение – с точностью $\pm 20''$. Исключение составляет пульсар J1932-0108, точность определения прямого восхождения для него составляет $\pm 1.5^m$, а склонения - $\pm 30'$. В 4 столбце приведены периоды пульсаров (P) с ошибкой определения ± 0.0005 с для всех кроме пульсара J1932-0108. Для него ошибка определения периода оценивается в ± 0.001 с. В 5 столбце приведена мера дисперсии DM. В 6 столбце показана полуширина среднего профиля ($W_{0.5}$), но так как для большинства новых пульсаров отношение сигнала к шуму было небольшим, полуширина среднего профиля может оказаться больше или меньше приведенных в таблице значений примерно в полтора раза. Видимая мощность (вм) пульсара приведена в 7 столбце и обозначает сильные пульсары цифрой 1, средние по мощности пульсары цифрой 2 и самые слабые - цифрой 3.

9 из 18-ти обнаруженных пульсаров со средним значением меры дисперсии ~ 20 пк/см³ расположены далеко от плоскости Галактики в областях с

минимальной фоновой температурой. Еще 4 пульсара со средним значением меры дисперсии ~ 40 пк/см³ находятся близко к плоскости Галактики. Оставшиеся пять пульсаров, среднее значение меры дисперсии которых составляет ~ 30 пк/см³, располагаются в области северного полярного шпура, где вероятно повышенная концентрация электронов. Один из них, пульсар J1243+1752, по нашим оценкам имеет меру дисперсии 5 ± 3 пк/см³. Учитывая ошибку определения меры дисперсии этого пульсара, можно сказать, что он является одним из самых близких к Солнцу из всех известных на сегодняшний день пульсаров. На наш взгляд, интересными могут оказаться и пульсары J2051+1332, J1844+4118, J1528+4053 и J1243+1752, так как все они обладают широкими средними профилями и, вероятно, близки к соосным ротаторам.

В процессе обработки суммарных спектров мощности применялся метод автоматической калибровки, основанный на анализе шумового фона. Калибровка осуществлялась индивидуально для каждого частотного канала и каждого сеанса проводимых наблюдений и включала в себя несколько этапов. Сначала для каждого частотного канала на интервале длительностью 204,8 секунды (что соответствует 2048 точкам) производилась фильтрация помех и вычиталась базовая линия. Затем считалась дисперсия шумов. Далее производилось масштабирование сигнала: амплитуда в каждой точке делилась на полученное значение дисперсии. Благодаря такому преобразованию итоговая дисперсия всего массива данных оказывалась равна единице. После этого для каждого частотного канала отдельно рассчитывались спектры мощности, которые впоследствии суммировались. Данная последовательность операций повторялась ежедневно для выбранного направления на небе.

Предполагалось, что если в некоторые дни наблюдений чувствительность БСА уменьшалась по каким-то причинам, например, из-за возникновения помех, то описанная выше процедура нормировки подавит такие шумы, так что при сложении спектров мощности за весь период наблюдений в итоговом спектре мощности влияние неудачных дней окажется незначительным. Однако дальнейший анализ показал, что даже если исключить из рассмотрения плохие помеховые дни, все равно остается немало таких дней наблюдений, в которых качество данных является достаточно низким. То есть, складывая оставшиеся спектры мощности за весь период наблюдений, мы все равно получаем недостаточно хорошее отношение сигнала/шум в полученном спектре по сравнению с тем спектром, в котором данные плохого качества не использовались бы в об-

работке изначально. Поэтому в нашей следующей работе по поиску пульсаров, проведенному в 6-канальных частотных данных на интервале 5 лет, мы протестировали другую систему калибровки данных [39]. На этот раз использовались сигналы от шумового генератора. Сигнал записывался в виде OFF-ON-OFF, при этом каждому этапу было отведено по 5 секунд. Температура сигналов OFF составляет 300 К, а сигналов ON – 2400 К. На рисунке 1.5 приведен такой калибровочный сигнал вместе с индивидуальными импульсами пульсара J1921+2153, которые были записаны в одном из сеансов наблюдений в 6 - частотных каналах.

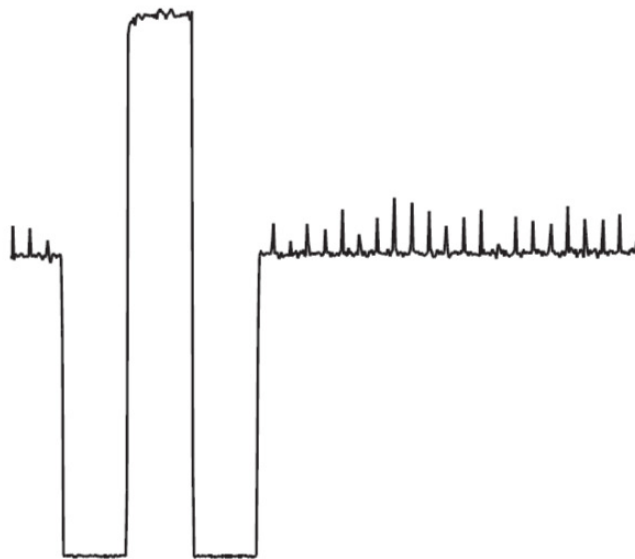


Рисунок 1.5 — Калибровочный сигнал (OFF-ON-OFF) и индивидуальные импульсы от известного пульсара PSR J1921+2153 с периодом $P=1.337$ с и мерой дисперсии $DM=12.4$ пк/см³, записанные в одном из шести частотных каналов. Ширина канала 430 кГц. Рисунок взят из [39].

После того, как данные для каждого направления на небе будут откалиброваны, можно выстроить дисперсии этих сигналов по порядку. При этом минимальные дисперсии будут соответствовать наблюдениям с наилучшим качеством, а максимальные - низкокачественным наблюдениям. Исследуемая площадка, по склонениям простирающаяся от -9° до $+42^\circ$, включает в себя около 40000 направлений (пикселей), для каждого из которых, как было сказано выше, ежедневно вычислялась дисперсия после нормировки с калибровочным сигналом, в результате чего было накоплено примерно 10^8 оценок дисперсии шумов. Если известна минимальная дисперсия для всего периода наблюдений и дисперсия шумов для каждого дня, то мы можем сделать оценку реального

отношения сигнала к шуму. В предыдущей работе [37] мы предполагали, что конечное увеличение отношения сигнал/шум пропорционально корню квадратному из количества дней наблюдений, и теперь стало возможным проверить это предположение экспериментально с учетом реальных оценок дисперсии шумов.

На рисунке 1.6 показаны ожидаемое и реальное увеличение отношения сигнал/шум для одного из направлений на небе за все время наблюдений (5 лет). Верхняя кривая соответствует теоретическому, максимально возможному увеличению сигнала к шуму, а нижняя описывает реальное поведение этого отношения в суммарных спектрах мощности.

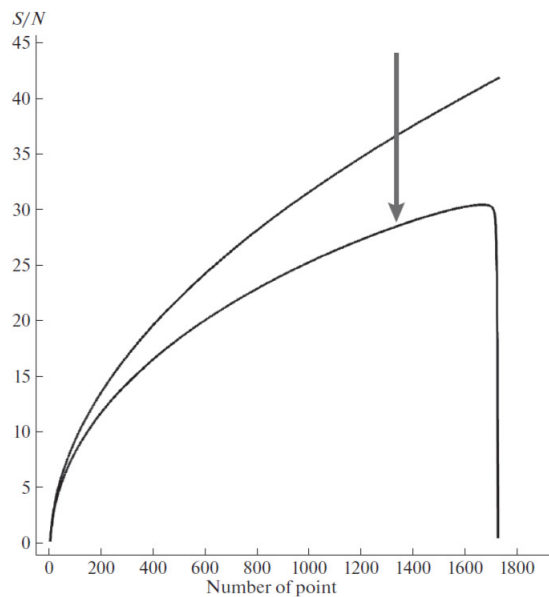


Рисунок 1.6 — Зависимость отношения сигнала к шуму от времени. Рисунок взят из [39].

Как видно из рисунка, реальное отношение сигнал/шум сначала очень близко к теоретическому, но затем все сильнее отклоняется. За все время наблюдений для разных направлений на небе накапливается от 30 до 60 дней с плохим качеством шумовой дорожки. Если выстраивать дисперсии шумов по порядку, то все такие дни попадут в конец такого ряда, в результате чего при сложении всех спектров мощности мы получим не рост отношения сигнал/шум, а его резкое падение, что и продемонстрировано на рисунке 1.6. Вертикальной стрелкой показана граница того количества дней, которые были использованы для сложения спектров мощности для проверяемого пикселя, то есть суммарный спектр мощности был построен для 1300 дней. Из рисунка видно, что мы получили рост отношения сигнал/шум в 28.7 раза при ожидаемой величине

в 36 раз. Протестировав разные направления на небе, мы выяснили, что рост отношения сигнал/шум находится в интервале от 20 до 30 раз. Так как полуширина импульса обычного секундного пульсара лежит в промежутке от 20 до 30 мс, а время считывания в наших наблюдениях составляет 100 мс, то конечное отношение сигнал/шум будет еще в 1.5 – 2 раза меньше.

Как и в предыдущей работе [37] первичный поиск гармоник в спектрах мощности был выполнен программой BSA-Analytics, но далее автором диссертации визуально были просмотрены все 40000 направлений на небе. В ходе просмотра из числа кандидатов в пульсары сразу удалялись все известные пульсары, так как все кандидаты сразу проверялись по каталогу ATNF (<http://www.atnf.csiro.au/people/pulsar/psrcat/>). Таким образом было отобрано 87 кандидатов, которые ранее нами не исследовались. Дальнейший анализ показал, что 23 из них отождествляются с известными пульсарами, частично наблюдаемыми в боковых лепестках диаграммы направленности БСА, которые мы не обнаруживали в более ранних работах. Еще 8 источников оказались периодическими помехами. Для оставшихся 56 источников проводился дополнительный поиск в исходных данных, в результате которого достаточно сильных и уверенных кандидатов в пульсары осталось всего 5. Критерием отбора послужило наличие как минимум двух гармоник в их суммарных спектрах мощности. Периоды всех кандидатов превышают 0.4 с.

Проверка кандидатов происходила следующим образом. По каждому из них из всех спектров мощности выбирались те, у которых гармоники по частоте соответствовали гармоникам в суммарном спектре мощности. После этого отбора и выполнялся поиск методом перебора мер дисперсий и периодов. При этом входными параметрами для работы программы служили предполагаемый период источника, звездное время, соответствующее середине проверяемого промежутка, и дата наблюдений. Поиск в первичных данных программой обработки выполняется во временном интервале ± 3 минуты от заданного времени с шагом в 20 секунд. Благодаря этому мы можем уточнить координату пульсара, его прямое восхождение, если этот пульсар будет обнаружен. Таким образом на промежутке времени в 6 минут на каждом шаге производится перебор мер дисперсий от 0 до 200 пк/см³ и периодов в промежутке $\pm 10\%$ от заданного значения. В процессе этой обработки сохраняются те средние профили, у которых на двойных периодах отношение сигнал/шум ≥ 5 . После обработки всех данных с помощью программы можно просматривать результаты сумми-

рования средних профилей и зависимостей сигнал/шум от меры дисперсии за любое количество дней, и все пять кандидатов в новые пульсары проверялись в 32-канальных данных. Для всех пяти новых пульсаров отношение длительности импульса к периоду оказалось примерно одним и тем же, поэтому их средние профили очень похожи внешне. На рисунке 1.7 показаны два из них, остальные изображения со средними профилями можно увидеть на нашем сайте (<https://bsa-analytics.prao.ru/pulsars/new.php>).

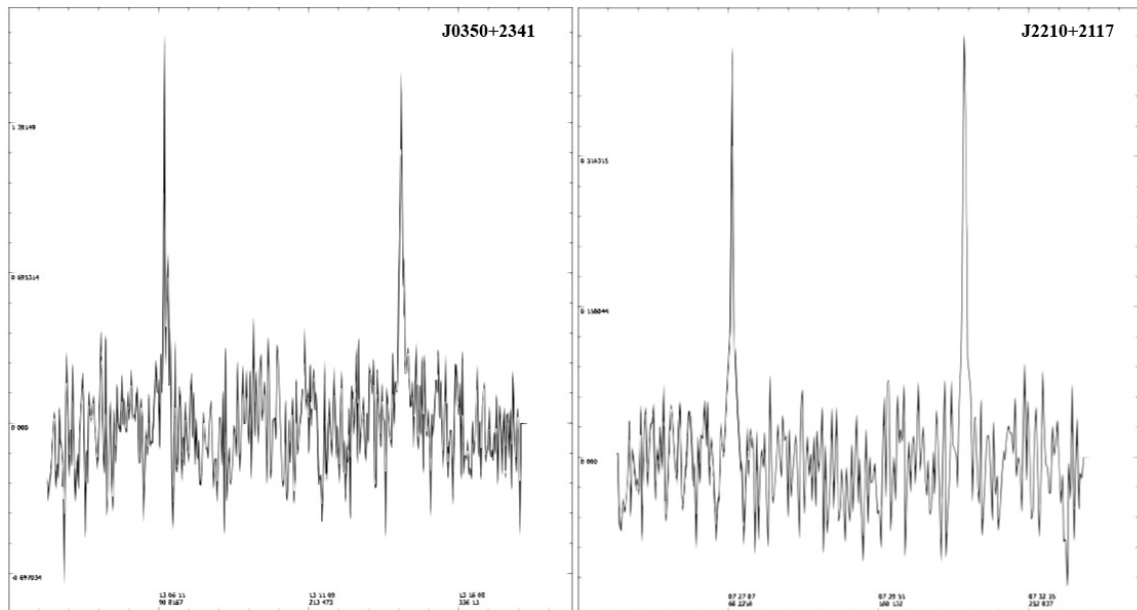


Рисунок 1.7 — Средние профили с двойным периодом для новых пульсаров J0350+2341 и J2210+2117. Рисунок взят из [39].

В Таблице 2 перечислены характеристики обнаруженных пульсаров. Имя пульсара на эпоху 2000 года приведено в 1 столбце, его координаты, прямое восхождение и склонение, соответственно во 2 и 3 столбцах также на эпоху 2000 года. Точность определения этих координат на антенне БСА составляет $\pm 30^s$ для прямого восхождения и ± 15 угловых минут для склонения. Период пульсара P с точностью ± 0.0005 с приводится в четвертом столбце, мера дисперсии DM – в пятом. Видимая ширина среднего профиля $W_{0.5}$ показана в 6 столбце, но реальная величина этой характеристики может быть меньше приведенной, так как оценка возможного уширения импульса пульсара за меру дисперсии в полосе частотного канала нами не проводилась.

Для 51 источника в 32-канальных данных не удалось найти ни одного такого отдельного дня, для которого можно было бы построить хотя бы средний профиль. На рисунке 1.8 приводится спектр мощности для самого сильного

Таблица 2 — Характеристики новых пульсаров

Имя	α_{2000}	δ_{2000}	P (сек)	DM (пк/см ³)	$W_{0.5}$ (мс)
J0305+1127	03 ^h 05 ^m 50 ^s	+11° 27'	0.8636	26.5±1.5	16
J0350+2341	03 ^h 50 ^m 03 ^s	+23° 41'	2.4212	61±1.5	21
J1740+2728	17 ^h 40 ^m 17 ^s	+27° 28'	1.0582	35±2	21
J1958+2213	19 ^h 58 ^m 34 ^s	+22° 13'	1.0502	85±3	21
J2210+2117	22 ^h 10 ^m 15 ^s	+21° 17'	1.7769	45±2	25

из этих кандидатов, J1921+3357, имеющего период 1.441 с. У этого источника хорошо видны три гармоники, тем не менее не удалось определить его меру дисперсии. В каталоге ATNF похожих по характеристикам пульсаров не нашлось. Мы предположили, что этот источник является пульсаром, но тогда подтвердить это не смогли. Позднее в работе [Tyulbashev22mngas] мы вновь зарегистрировали этот пульсар (J1921+34) и смогли определить его меру дисперсии $DM=80\pm 3$ пк/см³. Таблица взята из [39].

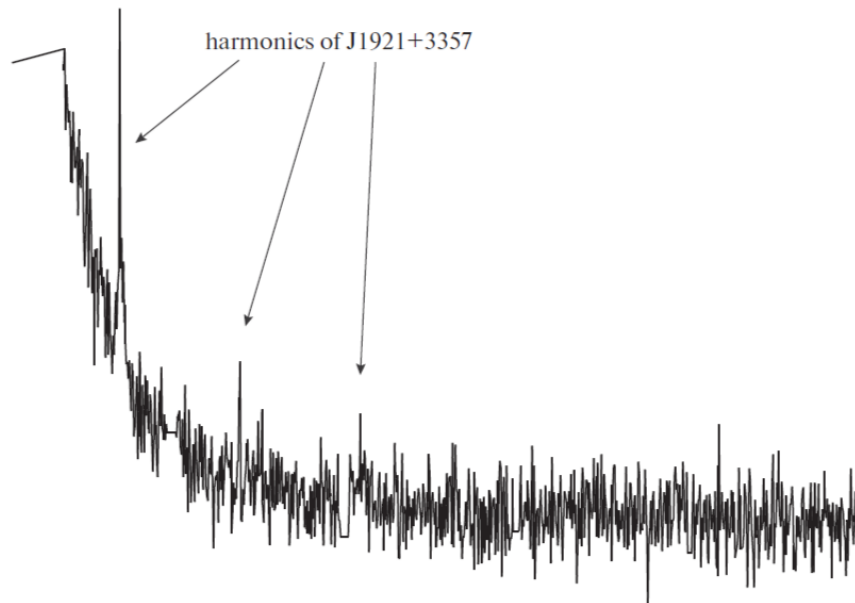


Рисунок 1.8 — Спектр мощности источника J1921+3357, не попавшего в список новых пульсаров. Рисунок взят из [39].

Еще два источника, J1743+1300 с периодом $P=1.061$ с и мерой дисперсии $DM=74\pm 20$ пк/см³ и J2022+2122 с периодом $P=0.803$ с и мерой дисперсии $DM=50\pm 20$ пк/см³, также не были включены в число новых пульсаров из-за того, что отношение сигнал/шум на зависимости СШ от DM в максимуме у

них не превышало 4. Когда работа была выполнена и готовилась к печати, появилась статья [40] об обзоре на LOFAR, в которой сообщалось об открытии пульсаров, среди которых были и наши кандидаты, очень близкие по полученным нами характеристикам. Это пульсар J1745+12 с $P=1.0599$ с и $DM=66.32$ пк/см³ и пульсар J2022+21 с $P=0.8035$ и $DM=73.52$ пк/см³.

Как было сказано ранее, примененный нами метод поиска пульсаров путем сложения Фурье-спектров мощности оптимален для пульсаров со стабильными плотностями потока, а также для пульсаров, имеющих переменность, но настолько сильных, что индивидуальные записи для них можно фиксировать регулярно. Для пульсаров вспышечных или тех, что обладают собственной переменностью, транзиентов, а также близких к нам пульсаров, чьи меры дисперсии не превышают 20 пк/см³, и, как следствие, обладающих сильной переменностью, вызванной межзвездными мерцаниями, представленный метод поиска не является особо эффективным, и требуется другая методика для поиска таких объектов.

1.3 Поиск секундных (медленных) пульсаров по данным обзора с низким частотно-временным разрешением

Поиск секундных пульсаров проводился по выборке кандидатов в новые пульсары на склонениях от -9° до $+42^\circ$. Эти кандидаты ранее были найдены в суммированных спектрах мощности, полученных по данным обзора, проводимого с низким частотно-временным разрешением на антенне БСА3. Координаты используемых 120 лучей антенны фиксированы и перекрывают склонения от -9° до $+52^\circ$. Всего в качестве кандидатов рассматривались более ста источников, которые мы не смогли ни отождествить с пульсарами, известными на 2019 год, ни показать, что исследуемый кандидат является новым пульсаром. Необходимо было разработать способ, при помощи которого можно было бы подтвердить обнаружение нового пульсара. Для этого была создана программа обработки BSA-Analytics, считающая спектры мощности и периодограммы по длинным данным при переборе разных DM. Эта программа позволяет для кандидата в пульсары проверять в суммированных спектрах мощности зависимости P/DM , $(S/N)/DM$, $(S/N)/W_e$, S/N в зависимости от сдвига ожидаемой координаты пульсара внутри диаграммы направленности. Алгоритм, разработанный для новой программы, работает следующим образом: для заданного направления и для данного дня отдельные спектры мощности считаются после

компенсации DM, перебираемых в границах $0 \leq DM \leq 1000$ пк/см³ и при переборе разных усреднений сырых данных с шагом 2 (1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 точки). Шаг усреднения 1 соответствует предполагаемой ширине среднего профиля пульсара 12.5 мс, а шаг 64 соответствует ширине профиля пульсара $12.5 \cdot 64 = 800$ мс. Таким образом, при поиске пульсаров для заданного направления на небе при обработке одной сессии длинных данных мы сохраняем в оперативной памяти тысячи спектров мощности вместо получаемого одного спектра мощности в старом варианте обработки коротких данных. Обработывая последующие дни, мы складываем эти спектры мощности и получаем суммированные спектры на месячных и годовых интервалах, а также на полном интервале наблюдений. На время выполнения данной работы данные были накоплены на интервале 2014-2019 гг. В результате для обнаружения новых пульсаров и получения их базовых характеристик создаются карты с визуализацией суммированных спектров мощности. Если частотные каналы сырых данных были сложены на мере дисперсии пульсара, после получения спектра мощности должен наблюдаться максимум в гармонике, соответствующей периоду пульсара. Сложение спектров мощности за много дней усилит отношение С/Ш.

Карта, составленная по извлекаемым из памяти программы спектрам мощности, отражает высоту гармоник в суммарном спектре мощности в единицах С/Ш. На вертикальной оси карты показываются перебираемые меры дисперсии DM, а на горизонтальной оси предполагаемые периоды P (см. рисунок 1.9). Кружками разного размера показаны гармоники с $C/Ш > 4$. Так как период пульсара не изменяется, то точки и кружки, соответствующие гармоникам пульсара с разными С/Ш, должны лежать на линии, параллельной вертикальной оси. Максимальный С/Ш гармоники должен наблюдаться в суммированном спектре мощности, который был получен, когда частотные каналы сырых данных складывались на истинной DM пульсара. Область, занимаемая вертикальной полоской (высота полоски), должна зависеть от ширины среднего профиля. Чем уже средний профиль, тем короче полоска. Если в суммированном спектре мощности видны несколько гармоник, то на карте появится несколько параллельных полос. Карта является интерактивной, поэтому при визуальном обнаружении кандидата в пульсары (вертикальная полоска), щелчком мыши можно вызвать суммированный спектр мощности, построить зависимость высоты гармоник в единицах С/Ш от усреднения, используемого для сырых данных. Можно отследить высоту гармоник на заданной мере дис-

персии от сдвигов времени на $\pm 1, 2, 3$ минуты от предполагаемой координаты по прямому восхождению. Изменение высоты гармоники в спектрах мощности на разных временных сдвигах позволяет уточнить координату пульсара. Спектр мощности определяется на массиве длиной $204.8\text{с} = 12.5\text{мс} * 16384\text{точки}$, что примерно равно времени прохождения источника через половину диаграммы направленности БСА ФИАН. За сутки таких кусочков наблюдается $(24 * 3600) / 204.8 = 422$. Обзор проведен в 96 лучах БСАЗ, перекрывающих небо вдоль меридиана, и поэтому все небо на склонениях $-9^\circ < \delta < +42^\circ$ можно представить как $422 * 96 \approx 40500$ направлений лучей, перекрывающих за сутки площадку в 17000 кв.град . Одно направление – это площадка $17000 / 40500 = 0.4\text{ кв.град}$. Таким образом, поиск будет проводиться в 40500 точках на небе, соответствующих разным положениям лучей БСА ФИАН. Мы представляем доступную на небе площадку как 40500 пикселей, которые просматриваются визуально.

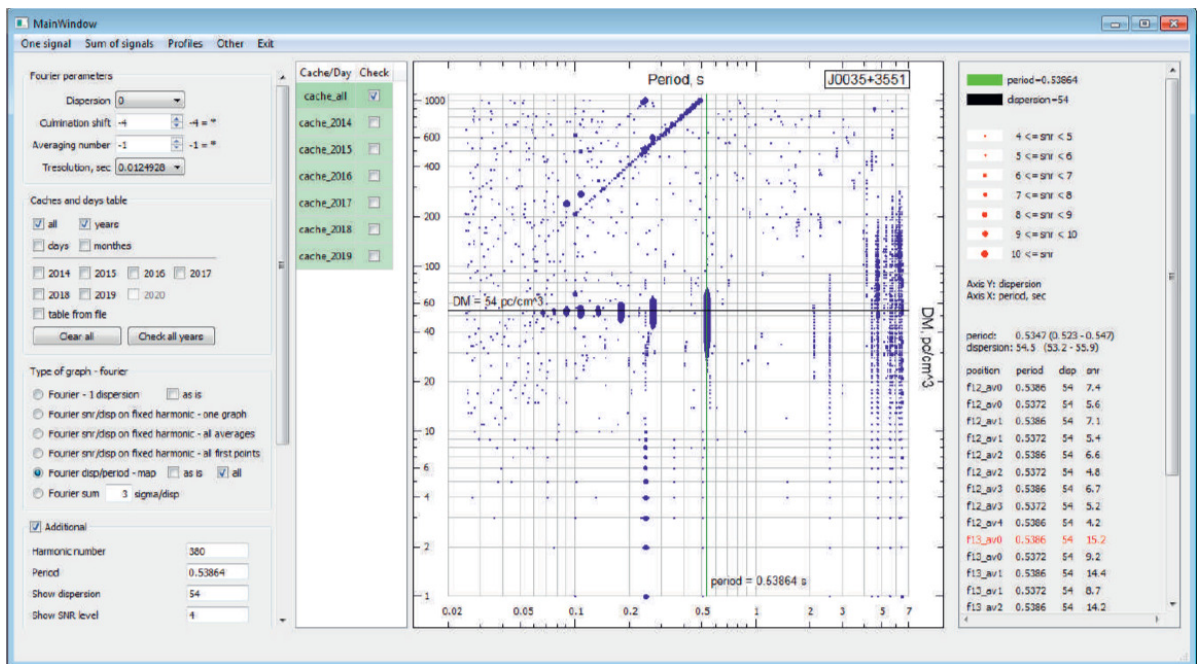


Рисунок 1.9 — Вид окна визуализации суммарных спектров мощности.

(Рисунок взят из [41]).

На рисунке 1.10 слева направо показаны: рабочее окно программы, визуализирующее спектры мощности (карта); спектр мощности; зависимость высоты гармоники от перебираемой DM. Для демонстрации был выбран пульсар J1745+12, опубликованный в работах [40], [39]. Этот пульсар был одним из кандидатов, обнаруженных в суммированных на четырехлетнем интервале

спектрах мощности, полученных по коротким данным. Ранее нам не удалось найти ни одной записи в длинных данных, чтобы дать оценку DM и построить средний профиль.

На карте представлена сумма примерно 800 спектров мощности, полученных по длинным данным. При визуализации спектров на левой части рисунка можно выделить 5 характерных областей, две из которых выглядят как два набора вертикальных полосок. Первый набор (область 1) состоит из 15 полосок. Определяемая по рисунку $DM=49\pm 1$ пк/см³, а период $P=0.804$ с. Оказалось, что на прямом восхождении $\alpha_{2000}=17^h45^m$, соответствующем времени прохождения источника через меридиан, на краю диаграммы БСА наблюдается часть излучения от известного пульсара J1740+1311, у которого, согласно ATNF, $DM=48.668$ пк/см³, а $P=0.80305$ с.

Набор точек на карте, обозначенный как область 2, состоит из четырех полосок. Характеристики пульсара (прямое восхождение, склонение, период, мера дисперсии), определяемые с помощью программы визуализации: $\alpha_{2000}=17^h45^m\pm 1.5^m$; $\delta_{2000}=13^\circ 02'\pm 20'$; $P=1.059\pm 0.001$ с; $DM=66.5\pm 1$ пк/см³. Как упоминалось выше, этот кандидат в пульсары был зарегистрирован в наших наблюдениях, но не имел оценки DM и был опубликован в работе [40]. Согласно этой работе $\alpha_{2000}=17^h45^m44^s$, $\delta_{2000}=12^\circ 52'38''$, $P=1.0599$ с, $DM=66.141$ пк/см³. Оценки плотности потока пульсара на частотах 128-1532 МГц были даны в работе [42]: $S_{128}=9.6$ мЯн; $S_{167}=5.5$ мЯн; $S_{334}=2.2$ мЯн; $S_{1532} < 0.08$ мЯн. Используя приведенный в работе спектральный индекс $\alpha=1.5$ ($S \sim \nu^{-\alpha}$), можно оценить ожидаемую плотность потока на центральной частоте наблюдений БСА3 ($S_{110.3}=12$ мЯн). Источник находится во внегалактической плоскости (галактическая широта $b=20.3^\circ$). Оценка чувствительности для секундных пульсаров, находящихся вне плоскости Галактики, $S_{min}=6-8$ мЯн [36]. Следовательно, J1745+1252 должен быть виден в одиночных сеансах наблюдений. Однако учитывая, что источник наблюдается не в зените и координаты луча по склонению не совпадают со склонением источника, мы оценили ожидаемую чувствительность БСА3 в направлении на источник в пределах 12-16 мЯн. То есть источник находится на пределе чувствительности радиотелескопа БСА3 при наблюдениях в одном сеансе в направлении источника. В суммированных спектрах мощности, полученных по коротким данным, чувствительность возросла примерно в 25 раз, и поэтому пульсар J1745+1252 хорошо виден на карте.

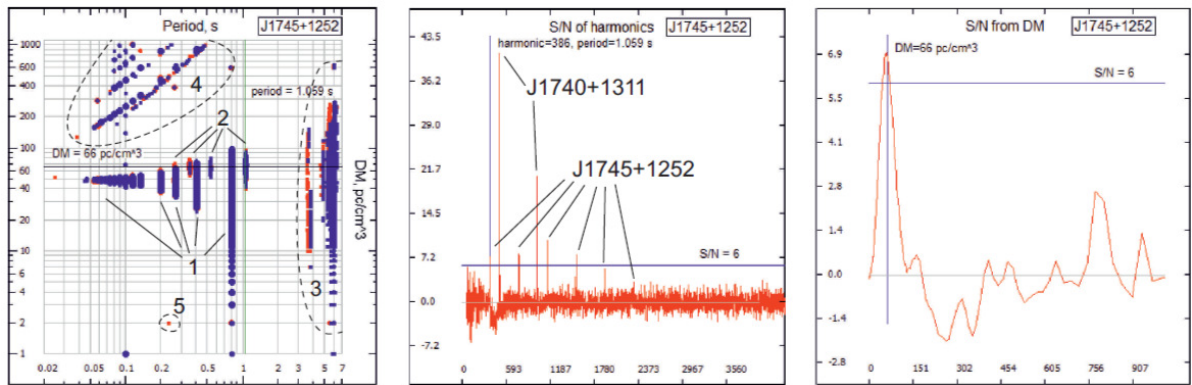


Рисунок 1.10 — На рисунке слева направо показаны части рабочего окна программы визуализации: точки P/DM , где $S/N \geq 6$ для всех посчитанных спектров (карта); один из спектров мощности, соответствующий карте слева; зависимость $(S/N)/DM$ для первой гармоник пульсара J1745+1252. На карте (левый рисунок) показаны кружки разного размера, указывающие на S/N гармоник. На вертикальной оси отражены DM , на горизонтальной оси P .

Горизонтальная и вертикальная линии на рисунке указывают на предполагаемый период и меру дисперсии пульсара. Числа 1 и 2 указывают на пульсары J1740+1311 и J1745+1252, видимые на карте. Число 3 показывает область низкочастотных шумов, ограничивающих максимальные периоды, которые можно регистрировать на этой карте. Число 4 показывает область, в которой видны диагональные линии. Эти линии порождены как пульсарами, так и периодическими помехами. Число 5 указывает на пример периодической помехи, наблюдаемой на $S/N > 6$. На среднем рисунке представлено окно с фрагментом суммированного спектра мощности, где по вертикальной оси показана амплитуда гармоник в единицах S/N , а на горизонтальной оси - номер точки в спектре мощности. Длина фрагмента составляет 4500 точек из 16384 точек спектра. Программа визуализации при выборе точки в спектре мощности выводит на экран текущее значение P_0 (первая гармоника, на рисунке показана синей линией). Горизонтальные линии на рисунке отмечают $S/N=0$ и $S/N=6$. На правом рисунке видно, что высота первой гармоник пульсара J1745+1252 растет до $DM=66 \text{ пк/см}^3$, а затем уменьшается.

(Рисунок взят из [41]).

На карте показаны сигналы с $S/N \geq 6$. При реальной обработке на карту выводятся минимальные сигналы с $S/N \geq 4$, и поэтому на таких рабочих картах много «мусорных» точек, указывающих на наблюдаемые слабые периодические сигналы. На карте P/DM помимо набора вертикальных полосок видны низкочастотные шумы на периодах больше 3 с. В верхней части рисунка расположены диагональные линии, порожденные как пульсарами, видимыми на карте, так и помехами.

Помимо карты P/DM на рисунке 1.10 показаны усредненный спектр мощности (средняя часть рисунка) и зависимость высоты первой гармоники пульсара J1745+1252 в единицах S/N от проверяемой DM (правая часть рисунка). В суммированном спектре мощности, полученном для сырых данных, собранных на $DM=66$ пк/см³, видны два набора гармоник, связанных с пульсарами J1740+1311 и J1745+1252. Для пульсара J1740+1311 в спектре мощности наблюдается всего две из пятнадцати гармоник, видимых на карте. Это связано с тем, что DM этого пульсара заметно отличается от DM, на которой получен спектр мощности. Во втором наборе видны шесть гармоник, четыре из которых имеют $S/N \geq 6$. На оригинальной карте, показывающей сигналы с $S/N \geq 4$, и на представленной картинке спектра мощности видна пятая гармоника ($S/N=5.3$). Слабая шестая гармоника видна в спектре мощности, но не отображается на оригинальных картах. S/N для нее примерно равен 3. В начале спектра мощности видно уширение шумовой дорожки и плохое вычитание базовой линии. Нам не удалось подобрать зависимость для корректного вычитания фона для всех возможных суммированных спектров. Это связано с тем, что в суммированном спектре мощности в первых нескольких сотнях точек наблюдается нелинейная зависимость. Практическая обработка показывает, что поиск пульсаров в наших данных при помощи спектров мощности хорошо работает для периодов, не превышающих 3-4 секунды.

Зависимость $(S/N)/DM$ в правой части рисунка показывает, что максимум первой гармоники пульсара J1745+1252 поднимается до $S/N=6.9$. Мы не проводим суммирования амплитуд гармоник в программе, но при проверке кандидатов обращаем внимание на гармоники, имеющие $S/N \geq 4$. Гармоники на $S/N < 6$ и ограниченность области DM, на которой они появляются, мы считаем косвенным признаком реальных пульсаров.

Для поиска пульсаров также используются суммированные периодограммы, которые получаются при помощи Fast Folding Algorithm (FFA). Согласно

работам [43], [44], [45] периодограммы могут обнаруживать более слабые сигналы, чем FFT для пульсаров с большими периодами, а также для пульсаров с большими скважностями. Однако, скорость обработки данных с использованием FFA ниже, чем с использованием FFT, и поэтому FFA используется реже, чем FFT. Мы использовали программу обработки для создания FFA карт, аналогичных FFT картам для тех кандидатов в пульсары, которые не были найдены на FFT картах. Используя FFA, мы создавали карты, аналогичные картам, полученным из усредненных спектров мощности, получали зависимости S/N гармоники от DM и все другие зависимости по аналогии с поиском при помощи FFT. Часть программы FFA, отвечающая за счет периодограмм, была взята из работы [45].

Рассмотрим теоретическую оценку чувствительности радиотелескопа БСА ФИАН с учетом ширины частотного канала, эффекта рассеяния, используемого времени считывания и изменения чувствительности антенной решетки в разных направлениях и проведем проверку практической чувствительности обзора по известным пульсарам, попадающим в площадку наблюдений.

Как было показано выше, пульсары, которые не регистрируются в наблюдениях на БСА ФИАН в одной наблюдательной сессии длительностью 3.5 минуты, прекрасно видны в суммированном спектре мощности и в суммированных периодограммах. Согласно рис.2 в работе [39] чувствительность в суммированном спектре мощности может вырасти в десятки раз при накоплении спектров мощности за несколько лет, и, следовательно, проводимый нами обзор может быть лучшим в мире из проведенных и проводимых в метровом диапазоне длин волн. Однако, лучшая чувствительность для БСА ФИАН достигается лишь для склонения $+55^\circ$, равного широте Пушино, когда наблюдаемые радиоисточники находятся точно в зените. Чувствительность зависит от высоты (z) источника над антенной при прохождении меридиана как $\cos(z)$ ($z = \varphi - \delta$, где φ – это широта Пушино). В дополнение к этому чувствительность будет падать, если координаты источника попадают между лучами БСА3, координаты которых фиксированы (см. рис.1 в работе [29]). Очень широкие частотные каналы приведут к уменьшению чувствительности из-за дисперсионного размазывания импульсов пульсара в полосе. Используемая нами постоянная времени может быть больше, чем ширина импульса пульсара, что так же приведет к уменьшению чувствительности. Наконец, эффект рассеяния, который тем силь-

нее, чем ниже частота наблюдений, также может уширять импульс пульсара и ухудшать чувствительность.

Возникает естественный вопрос: какова будет реальная чувствительность в проведенном обзоре? Ранняя оценка, приведенная в работе [36], указывает, что в одной сессии длительностью в 3 минуты типичная чувствительность вне плоскости Галактики составляет 6-8 мЯн, а в плоскости Галактики – 15-20 мЯн при наблюдениях в направлении на зенит. При получении этих оценок предполагалось, что мера дисперсии пульсара и время считывания точки сырых данных не влияют на получаемую оценку чувствительности.

Для расчета чувствительности при поиске пульсаров мы используем известную формулу [46]:

$$P_{min} = \frac{S/N * T_{sys}}{G * (n_p * t * \Delta\nu)^{1/2}} * \sqrt{\frac{W_e}{P - W_e}} \quad (1.1)$$

где S/N – отношение сигнала к шуму в гармонике (для оценок $S/N=6$); T_{sys} – температура системы вне и в плоскости Галактики (для оценок 800К и 1800К); G – параметр, связанный с эффективной площадью антенны ($G = A_{eff}/2k$, где k – постоянная Больцмана), и равный 17 К/Ян для БСА ФИАН; n_p – количество наблюдаемых линейных поляризацій (в нашем случае одна поляризация); t – длительность наблюдательной сессии в секундах (для оценок берем 180с); $\Delta\nu$ – полоса приема в мегагерцах (2.5 МГц). Параметры P и W_e – это предполагаемый период пульсара и ширина его среднего профиля. Для оценки чувствительности обычно считают, что $W_e=0.1P$. Однако ширина среднего профиля может стать больше, чем $0.1P$ из-за размазывания импульса в частотном канале на больших мерах дисперсии и из-за эффекта рассеяния. Оба эффекта приведут к ухудшению чувствительности. Для малых DM будет действительна формула 1.1, а для больших нужно учитывать дополнительное уширение среднего профиля:

$$W_e = (W_{0.1P}^2 + W_{\Delta t}^2 + W_{DM}^2 + W_{\tau}^2)^{1/2}, \quad (1.2)$$

где $W_{0.1P}$ – предполагаемая ширина среднего профиля; $W_{\Delta t}$ – время считывания точки сырых данных; W_{DM} – уширение импульса из-за размазывания в частотном канале, связанное с мерой дисперсии; W_{τ} – уширение среднего профиля из-за эффекта рассеяния. Ширины W определяются в мс и выражаются следующими формулами:

$$W_{0.1P} = 0.1P; W_{\Delta t} = \Delta t; W_{DM} = 4.1488 \cdot 10^6 \cdot (1/\nu_1^2 - 1/\nu_2^2) \cdot DM; W_{\tau} = 60 \cdot (DM/100)^{2.2},$$

где Δt – время считывания одной точки, ν_1 и ν_2 – частоты в МГц, определяющие ширину частотного канала ($\Delta\nu = \nu_1 - \nu_2$). Как правило, в проводимых обзорах время чтения одной точки составляет долю миллисекунды, что много меньше, чем предполагаемая ширина импульса секундного пульсара. В используемых нами данных с временем чтения точки 100 мс и 12.5 мс соотношение $0.1P \gg \Delta t$ не выполняется, поэтому нужно учитывать время считывания при оценке чувствительности. Соотношение для W_{τ} взято из работы [47]. В этом соотношении оценки рассеяния были получены по измерениям на частотах 40, 60, 111 МГц. Полученная зависимость сильно отличается от зависимости, опубликованной в работе [48] ($W_{\tau} \sim (DM)^{4.4}$), однако на мерах дисперсии $DM < 200$ пк/см³ зависимости приблизительно совпадают. Низкочастотные измерения уширений средних профилей, проведенные на LOFAR [49], подтверждают, что для пульсаров с $DM < 200$ пк/см³ рассеяния находятся в согласии с зависимостью, приведенной в работе [47].

Как показано в работе [36], при суммировании спектров мощности чувствительность растет меньше, чем корень квадратный из количества сложенных спектров мощности. Это связано с тем, что чувствительность радиотелескопа от одного сеанса наблюдений к другому сеансу наблюдений может изменяться из-за погодных условий, сломавшихся усилителей, обрывов линий диполей (особенно в зимнее время), не вычищенных помех и других факторов. Зависимости реального увеличения чувствительности построены для каждого пикселя на небе (пример зависимости см. рис.2 в работе [36]). Они показывают, что типичное отличие экспериментально определенной чувствительности от теоретической находится в пределах 10-30%. Здесь и ниже для оценок будем считать, что реальная чувствительность равна 0.8 от теоретической, которая, в свою очередь, определяется как корень из количества сложенных спектров мощности или периодограмм. При проведении мониторинговых наблюдений часть дней не обрабатывается. Эти дни связаны с регламентными работами на БСА ФИАН, авариями на электросетях, грозами, высокой активностью Солнца, другими источниками помех. В целом мы обрабатываем не менее 75% всех дней. Таким образом, можно оценить минимальный рост чувствительности в суммированных спектрах мощности и суммированных периодограммах как:

$$S_{min_sum} \leq \frac{S_{min}}{0.8 * (0.75 * N)^{1/2}} (mJy), \quad (1.3)$$

где N – это полное количество дней с середины августа 2014, когда стартовал поиск пульсаров. На Рис. 1.11 показана чувствительность в наблюдениях на БСА3 для коротких и длинных данных для одной наблюдательной сессии и с учетом некогерентного суммирования спектров или периодограмм, полученных в разные дни. На рисунке приведена чувствительность вне плоскости Галактики. Чувствительность в плоскости Галактики в 2.25 раза хуже ($1800K/800K=2.25$).

Увеличение чувствительности в проведенном обзоре с учетом суммирования спектров мощности составило $S_{min_sum_short} = 0.8 * (0.75 * 1595)^{1/2} = 28$ раз. Обработка длинных данных будет рассмотрена в следующем параграфе. Ожидаемое нами увеличение чувствительности $S_{min_sum_long} = 0.8 * (0.75 * 2690)^{1/2} = 36$ раз.

Сравнение левой и правой частей Рис.1.11 показывает, что чем меньше период, тем больше чувствительность обзора по поиску пульсаров определяется временем опроса данных и шириной частотного канала. Для коротких данных наилучшая чувствительность равна 14 мЯн для пульсаров с $P=0.2$ с и $DM \leq 20$ пк/см³ и резко ухудшается на больших DM . У пульсаров с $P > 1$ с и до $DM=50$ пк/см³ чувствительность примерно одинаковая, $S_{min}=6$ мЯн, и близка к теоретической, равной 4.4 мЯн [36], а на $DM > 50$ пк/см³ чувствительность начинает резко ухудшаться. Уменьшение времени опроса и ширины частотного канала в длинных данных приводит к улучшению чувствительности при поиске пульсаров с маленькими периодами и большими мерами дисперсии по сравнению с чувствительность обзора по коротким данным. Если рассматривать чувствительность при поиске пульсаров с $0.1 \text{ с} \leq P \leq 1 \text{ с}$ и $0 \leq DM \leq 200$ пк/см³, видно, что размывание импульса из-за слишком большой ширины частотного канала приведет к тому, что уже на $DM=100$ пк/см³ пульсары с $P=0.1$ с не будут видны. Рисунок для длинных данных показывает, что чувствительность обзора меняется мало и близка к наилучшей возможной $S_{min}=4.4$ мЯн для пульсаров с периодами $P > 0.5$ с и $DM \leq 100$ пк/см³. Из Рис.1.11 видно, что на $DM > 100$ пк/см³ чувствительность при поиске по длинным данным начинает резко ухудшаться для пульсаров с периодами $P \geq 0.5$ с, и связано это с эффектом рассеяния, увеличивающим ширину импульса. В то же время известно (см. рисунки в работах [48], [47]), что величина рассеяния на одной и той же мере дисперсии

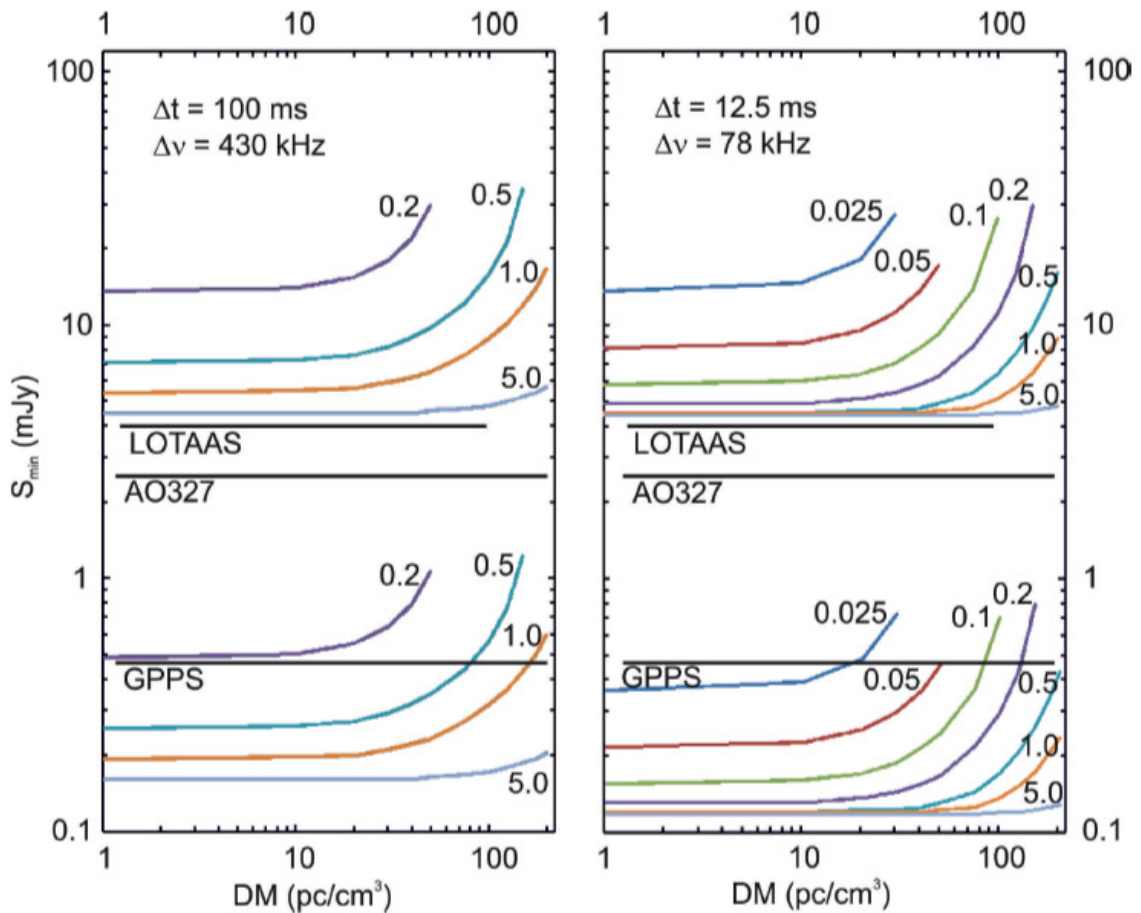


Рисунок 1.11 — В левой части рисунка показаны чувствительности S_{min} и $S_{min_sum_short}$ в мЯн (вертикальные оси) для разных предполагаемых периодов в зависимости от предполагаемой меры дисперсии (горизонтальная ось) в обзоре по коротким данным. Правая часть рисунка показывает то же самое для обзора по длинным данным. Числа рядом с кривыми указывают на периоды, для которых была сделана оценка чувствительности. Сплошным черным цветом нанесены чувствительности S_{min} лучших в мире на момент написания статьи обзорах по поиску пульсаров после перевода их чувствительностей S_{min} на нашу частоту 111 МГц. Это обзоры LOTAAS, AO327 и GPPS, проведенные, соответственно, на LOFAR [40], Arecibo [34], FAST [50]. (Рисунок взят из [41]).

может отличаться на три порядка. В частности, на рис.4 в работе [48] видны как минимум 4 пульсара, у которых рассеяние на $\text{DM}=500 \text{ пк}/\text{см}^3$ равно рассеянию на $\text{DM}=200 \text{ пк}/\text{см}^3$ во вписанной зависимости величины рассеяния от меры дисперсии. Исходя из работы [48] и оценок чувствительности на Рис.1.11 можно заключить, что отдельные пульсары с узкими импульсами (скважность

меньше 10^{-2}) и периодами больше, чем 2-3 с, все еще могут наблюдаться в нашем обзоре на $DM=1000$ пк/см³ при расплывании импульса из-за рассеяния почти на весь период.

Накопление спектров мощности и периодограмм увеличивает чувствительность и сдвигает зависимости $S_{min}(DM)$ вниз на Рис.1.11, но не изменяет границ DM , на которых имеет смысл проводить поиск пульсаров. Наилучшая чувствительность для пульсаров при проведении поиска по длинным данным равна $S_{min_{best}}=4.4\text{мЯн}/36=0.12$ мЯн в направлении на зенит. В реальности пульсары могут находиться не в зените, и их координаты могут попадать между лучами БСА3 и, тем самым, чувствительность будет ухудшаться. Если пренебречь зависимостью чувствительности от меры дисперсии и от периода, то типичная чувствительность будет составлять $S_{min_typical}=1.5*0.12=0.18$ мЯн, а наихудшая, когда пульсар наблюдается ровно между лучами БСА - $S_{min_worst}=2.5*0.12=0.3$ мЯн.

Для сравнения рассмотрим лучшие обзоры по поиску пульсаров, проведенные в разных частотных диапазонах с наилучшими чувствительностями. В метровом диапазоне длин волн одним из лучших является обзор LOTAAS, проведенный на LOFAR. Согласно [40] до меры дисперсии 50 пк/см³ для пульсаров с периодом 0.1 - 1 с при двухчасовой наблюдательной сессии чувствительность составляет примерно 1.2-1.5 мЯн на частоте 135 МГц ($\lambda=2.2$ метра) для наблюдений вне плоскости Галактики. При мере дисперсии 100 пк/см³ чувствительность с учетом рассеяния ухудшается до 3-5 мЯн. На мере дисперсии 200 пк/см³ рассеяние может ухудшить чувствительность в десятки раз. Эффект рассеяния сильно зависит от частоты наблюдений. Поэтому в двух других обзорах, имеющих высокую чувствительность при поиске пульсаров, вкладом рассеяния в уширение импульсов до мер дисперсии 200 пк/см³ можно пренебречь. В обзоре на 300-метровом зеркале Аресибо (АО327, [34]) на частоте 327 МГц ($\lambda=0.92$ м) чувствительность при поиске пульсаров с периодом 0.1 - 1 с в минутной сессии составляет примерно 0.4 мЯн. Очень высокую чувствительность имеет обзор, проводимый на 500-метровом зеркале FAST на частоте 1250 МГц (GPPS, [50]). При длительности наблюдательной сессии пять минут для пульсаров с периодом 0.1 - 1 с в обзоре на FAST достигнута чувствительность 0.005-0.01 мЯн. Предполагая, что спектральный индекс в спектрах всех пульсаров равен 1.7, можно привести чувствительности, достигаемые в пульсарных обзорах на частоту 111 МГц. Приведем оценки чувствительности в лучших обзорах по поиску

пульсаров, имеющих $DM < 100 \text{ пк/см}^3$ и $P > 0.5 \text{ с}$, находящихся вне плоскости Галактики: PUMPS – 0.1-0.3 мЯн, LOTAAS – 3-5 мЯн, AO327 – 2.5 мЯн, GPPS – 0.3-0.6 мЯн. Рис.1.11 показывает, что чувствительности обзоров PUMPS и GPPS сравнимы и в несколько раз превосходят чувствительность, достигаемую в других обзорах.

На Рис.1.12 визуальна представлена разница чувствительностей в обзорах по коротким и длинным данным. Для получения зависимостей на рисунках мы брали соотношение чувствительностей $S_{min_short}/S_{min_long}$ для одной наблюдательной сессии.

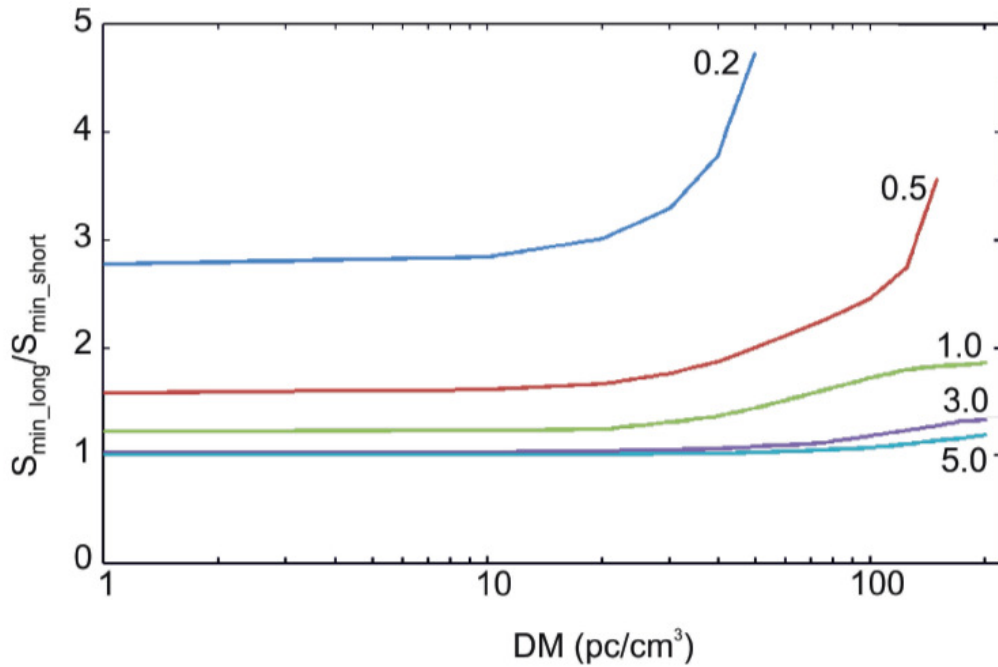


Рисунок 1.12 — Чувствительность в обзорах по коротким и длинным данным.

Числа на вертикальной оси на рисунке показывают, во сколько раз чувствительность в обзоре по длинным данным лучше чувствительности в обзоре по коротким данным. На нижней оси показаны меры дисперсии. Число рядом с кривой соответствует периоду в секундах. (Рисунок взят из [41]).

Используя данные на Рис.1.11 и 1.12, а также дополнительные расчеты (уравнение 1) и учитывая особенности БСАЗ как антенной решетки, можно определить ожидаемую полноту обзора, то есть уровень плотности потока, на

Таблица 3 — Уровни полноты в обзоре по коротким и длинным данным при накоплении за одну наблюдательную сессию длительностью 204.8 с, а также при накоплении 4 года ($4 \cdot 365 \cdot 204.8$ с для коротких данных) и 7 лет (для длинных данных). Таблица взята из [41].

S_{min_long} , mJy	$S_{min_long_sum}$, mJy	P, (с)	DM, (пк/см ³)	S_{min_short} , mJy	$S_{min_short_sum}$, mJy	P, (с)	DM, (пк/см ³)
45	1.25	0.025	<20	-	-	-	-
30	0.83	0.05	<35	-	-	-	-
23	0.64	0.1	<50	-	-	-	-
19	0.53	0.2	<70	51	1.82	0.2	<30
17.5	0.49	0.3	<80	36.5	1.30	0.3	<45
17	0.47	0.5	<105	26.5	0.95	0.5	<55
16.3	0.45	1.0	<150	20	0.71	1.0	<85
15.5	0.43	2.0	<200	17.5	0.63	2.0	<130
13.5	0.38	3.0	<200	17	0.61	3.0	<180
12	0.33	5.0	<200	14	0.50	5.0	<200

котором в обзоре гарантированно регистрируются все пульсары, не имеющие переменности. Для длинных и коротких данных для площадки $+21^\circ < \delta < +42^\circ$, где минимальны уровни помех, в Таблице 2 определена полнота для разных периодов и разных мер дисперсии в предположении, что полнота определяется наихудшими условиями наблюдения, а сами наблюдения проходят вне плоскости Галактики ($|b| > 10^\circ$). На мерах дисперсии больших, чем указано в колонках 4 и 8, чувствительность (колонки 1, 2, 5 и 6) начинает резко ухудшаться. Граница мер дисперсии определялась соответственно тому, как чувствительность падала в 1.5 раза от наилучшей на периоде, приведенном в колонках 3 и 7. Мы также предполагали, что исследуемый кандидат имеет самое плохое зенитное расстояние ($z=34^\circ$ для $\delta=+21^\circ$) и находится точно между двумя лучами БСА3, когда принимаемая энергия составляет 0.405 от пришедшей на антенну. Оценки полноты для наблюдений в плоскости Галактики будут в 2.25 раза больше и в Таблице 2 не приводятся.

Чувствительность в каждом из представленных на Рис.1.12 обзоров превосходит чувствительность обзоров, сделанных ранее. Казалось бы, в новых обзорах должны детектироваться все известные пульсары, находящиеся в исследуемых площадках. Однако это не так. В поиске пульсаров в обзоре LOTAAS (см. рис. 8, [40]) утверждается, что декларируемая чувствительность и количество повторных обнаружений находятся в согласии. Сравнение количества пульсаров в каталоге ATNF ($-3^\circ < \delta < +75^\circ$; $DM < 200$ пк/см³; $P_0 > 0.1$ с) и в таблице A1 (приложение A с повторными детектированиями пульсаров [40]) показывает, что LOFAR увидел примерно половину известных пульсаров. В обзоре АО327 [34] было детектировано 44 известных пульсара, что меньше 20% известных пульсаров, находящихся в каталоге ATNF ($-1^\circ < \delta < +75^\circ$; $|b| > 5^\circ$). В тексте статьи по обзору GPPS [50] нет явного упоминания о количестве известных пульсаров, которые не были обнаружены в границах площадки, где проводился обзор. Из ранних обзоров отметим Парксовский обзор [51]. В работе говорится, что в площадке обзора не удалось найти 15 из 161 известных пульсаров. То есть в обзоре не зарегистрировано 9.3% ранее детектированных пульсаров. Таким образом, можно утверждать, что часть известных пульсаров по каким-то причинам не обнаруживается в обзорах, которые проводятся в более широких полосах и с использованием улучшенных методов обработки данных.

Наиболее очевидными причинами, по которым пульсары, обнаруженные в одних обзорах, не видны в других обзорах, являются: возможные завалы или уплощения спектров на низких частотах, возможные рефракционные и дифракционные межзвездные мерцания, собственная переменность пульсаров. Для любого источника, видимого в одном обзоре по поиску пульсаров и не регистрируемого в другом обзоре нужно проводить специальное исследование для выявления причин «невидимости».

Отложим на некоторое время вопрос о регистрации известных пульсаров в нашем обзоре и обсудим сначала результаты этого обзора.

Главная цель любого нового обзора – это поиск новых пульсаров. Всего в обзоре было отобрано 135 кандидатов, у которых были обнаружены гармоники, имеющие $CS \geq 5$. Используя известные координаты по прямому восхождению и склонению для этих кандидатов, были получены суммированные спектры мощности на интервале 2014-2019 гг. Для получения спектров брались длинные данные, и окончательная проверка проводилась с помощью новой программы

визуализации, описанной выше. Если у нас возникали какие-либо сомнения, то дополнительно делался поиск суммированием периодограмм.

Из 135 проверяемых кандидатов 55 кандидатов в данных с высоким частотно-временным разрешением не подтверждены. Наблюдавшиеся гармоники оказались связаны с помехами. 35 кандидатов с помощью карт P/DM удалось отождествить с пульсарами, детектированными в боковых лепестках БСА ФИАН. Ранее мы не смогли показать обнаружение этих сильных пульсаров в боковых лепестках БСА, так как в спектре мощности, полученном по коротким данным, часто была видна вторая или последующие гармоники пульсара. При этом пульсар появлялся в боковой лепестке, координаты которого могут на десятки градусов отличаться от координаты пульсара, породившего этот боковой лепесток. Не имея оценки DM, нельзя было подобрать кандидата на возможное отождествление из каталога ATNF. Программа визуализации позволила легко отождествлять эти пульсары по их мере дисперсии и периоду. Еще 34 кандидата оказались известными пульсарами, которые не были детектированы в предыдущих работах.

В данном обзоре нами было обнаружено 11 новых пульсаров. На Рис.1.13 представлена карта P/DM для нового пульсара J2008+2755, имеющего наибольшую меру дисперсии из всех найденных пульсаров. Пульсар находится в плоскости Галактики (галактическая широта $b < +3^\circ$), где наша чувствительность, как говорилось выше, в 2.25 раза хуже, чем чувствительность вне плоскости Галактики. Обработка наблюдений J2008+2755 проводилась по 865 дням. Карта, построенная по длинным данным, показывает, что для первой гармоники $S/N=18.1$, $DM=154$ пк/см³, $P_0=1.5218$ с.

На Рис.1.11 показано, что чувствительность обзора резко ухудшается на больших DM, но с учетом регистрации пульсара J2008+2755 в суммированных спектрах мощности, полученных по коротким данным, можно ожидать обнаружения новых пульсаров, имеющих $DM > 200$ пк/см³ в длинных данных.

Ожидаемые плотности потока новых пульсаров могут быть ниже уровня чувствительности, достигаемого в одном сеансе наблюдений. Можно оценить S/N в одиночном сеансе для самых слабых пульсаров, обнаруживаемых на $S/N=6$ в суммированных спектрах мощности, если плотность потока пульсара не изменяется со временем: $S/N_{one_session}=6/28=0.2$. Следовательно, слабые пульсары обнаружить нельзя. Однако, пульсары могут иметь как собственную переменность, так и переменность, индуцируемую межзвездной плазмой. По-

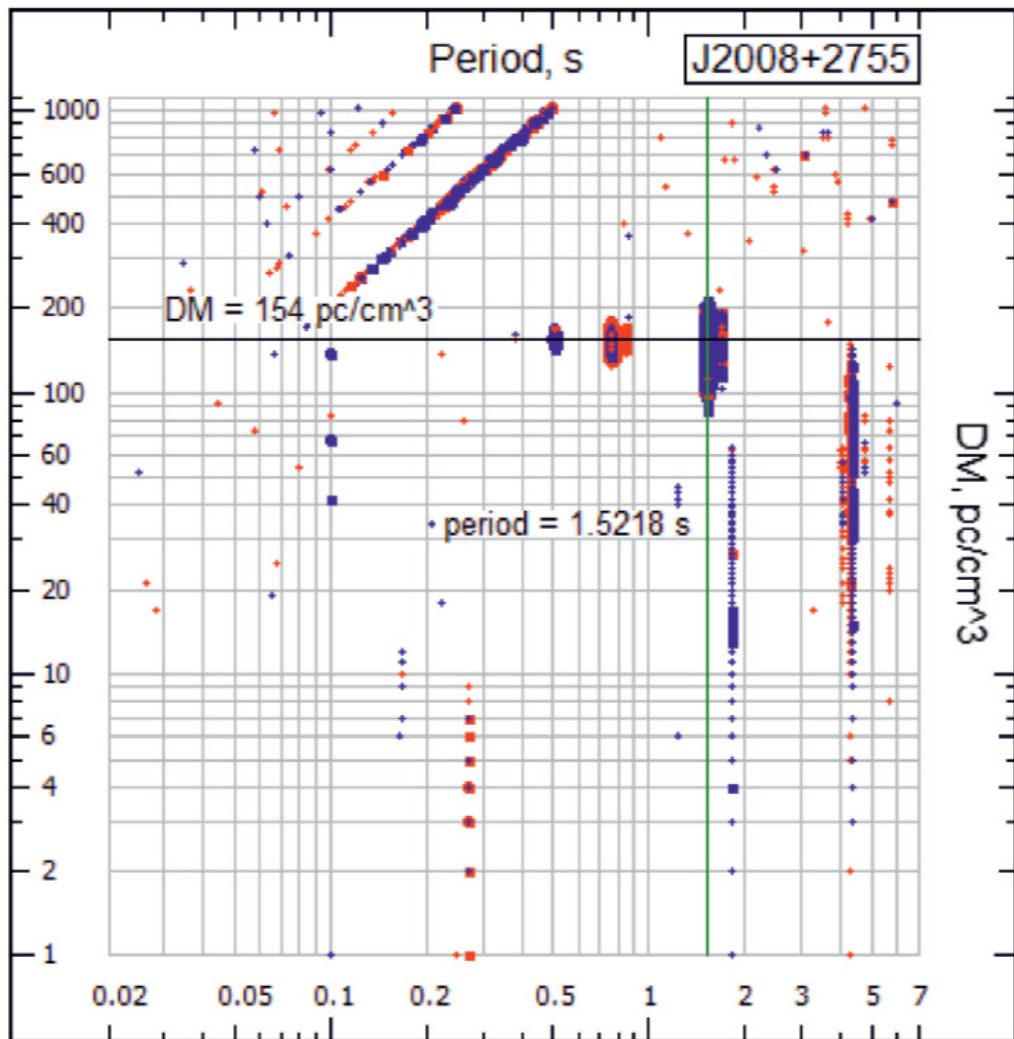


Рисунок 1.13 — На карте представлен пульсар J2008+2755, имеющий самую большую DM у открытых в обзоре пульсаров. При построении карты оставлены все сигналы с $S/N \geq 5$. У пульсара на линии $DM=154$ пк/см³ видны три вытянутых параллельно оси DM пятна и одна точка, соответствующие первым четырем гармоникам в спектре мощности этого пульсара. Рисунок взят из [41].

этому несмотря на то, что средняя плотность потока пульсаров может быть слишком мала для обнаружения на БСА3 в отдельных сеансах, видимая плотность потока иногда может возрасти, увеличивая наши шансы построить средний профиль.

Поиск дней, когда пульсары были достаточно сильны для детектирования в одной наблюдательной сессии, проводился по следующей схеме: а) проводилось выравнивание усиления в 32-частотных данных; б) вырезалось 16384 точки (примерно 204.8с); в) считались спектры мощности и определялись дни, когда

$S/N > 4$ в гармонике, соответствующей периоду пульсара; г) для выбранных дней перебирались периоды и меры дисперсии (прямой поиск) вблизи извлеченных в поиске. Наши вычислительные ресурсы не позволяют нам проверять все отобранные дни, но для каждого кандидата нами проверено от 30 до 50 дней. Средний профиль удалось получить только для одного из 11 открытых пульсаров. Он показан на Рис. 1.14. Пульсар J2105+19 имеет период $P=3.5297$ с. и меру дисперсии $DM=34$ пк/см³.

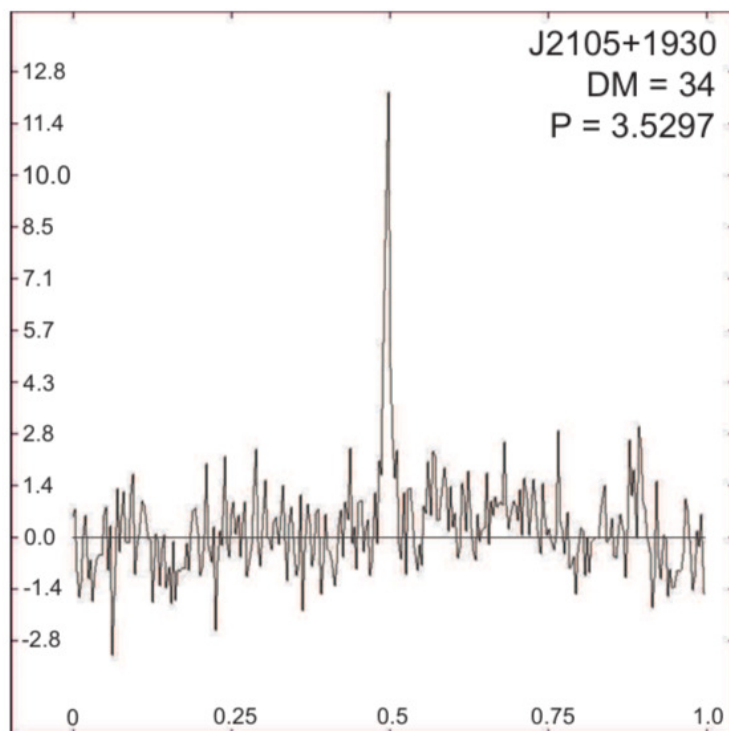


Рисунок 1.14 — Средний профиль пульсара J2105+19. По вертикальной оси показана амплитуда в условных единицах, по горизонтальной оси - фаза.

Рисунок взят из [41].

В Табл. 4 приведены оценки параметров открытых пульсаров. В первой колонке дано название пульсара. В колонках 2-7 приведены координаты по прямому восхождению и склонению, период, мера дисперсии, полуширина импульса, оценка расстояния до пульсара по модели YMW16 (<https://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/ymw16/>) [52]. Оценка расстояния до J2253+12 показывает, что модель YMW16 нуждается в улучшении для данного направления.

В таблице 4 показано 11 новых пульсаров. По завершении работы по проведенному обзору и подготовке статьи к отправке в журнал мы обнаружили, что

Таблица 4 — Характеристики новых пульсаров

Имя	α_{2000}	δ_{2000}	P (сек)	DM (пк/см ³)	$W_{0.5}$ (мс)	Расст. (кпс)
J0109+11	01 ^h 09 ^m 45 ^s	+11° 32'	0.4327	17±2	-	1.57
J0509+37	05 ^h 09 ^m 15 ^s	+37° 32'	2.4961	30±3	-	0.92
J1844+21	18 ^h 44 ^m 45 ^s	+21° 51'	0.5959	28±3	-	1.56
J1845+21	18 ^h 45 ^m 00 ^s	+21° 51'	3.7556	50±10	-	3.38
J1917+17	19 ^h 17 ^m 30 ^s	+17° 24'	0.4196	40±2	-	1.74
J1921+34	19 ^h 21 ^m 45 ^s	+34° 07'	1.444	85±5	-	7.29
J2008+27	20 ^h 08 ^m 15 ^s	+27° 55'	1.5218	154±5	-	7.52
J2029+34	20 ^h 29 ^m 45 ^s	+34° 37'	1.8194	97±5	-	5.19
J2105+19	21 ^h 05 ^m 45 ^s	+19° 24'	3.5297	35±3	35	3.05
J2253+12	22 ^h 53 ^m 15 ^s	+12° 32'	0.9793	37±5	-	>25
J2333+20	23 ^h 33 ^m 45 ^s	+20° 18'	2.2911	17±5	-	1.18

в обзоре GPPS [50] детектирован пульсар J2008+2755, имеющий $P=1.51926$, $DM=155.1$ пк/см³. По-видимому, он совпадает с обнаруженным нами J2008+27. Также найдено, что пульсар J2105+19 близок по мере дисперсии и координатам к RRAT J2105+19 [53], у которого период не был определен. По-видимому, нам удалось обнаружить регулярное излучение этого вращающегося транзिएнта. (Таблица взята из [41]).

Вернемся к вопросу о регистрации известных пульсаров в нашем обзоре. Как известно, пульсары имеют крутые спектры, но если говорить о наблюдениях в метровом диапазоне, то часто наблюдается уплощение спектров или даже завал ([54], [55]). В случае завала спектра пульсар, видимый на высоких частотах, может не наблюдаться на низких частотах. Поэтому правильнее сравнивать количество наблюдаемых пульсаров в обзорах, которые проводились на близких частотах. В этом случае можно ожидать, что даже при ошибочном спектральном индексе пересчет плотности потока не приведет к большим погрешностям. Обзор LOTAAS [40], проведенный на LOFAR, является близким по центральной частоте наблюдений к нашему обзору на БСА3.

Для проверки мы выбрали площадку $+21^\circ < \delta < +42^\circ$, где наблюдается минимум помех, а сама площадка максимально близка к зениту. Согласно Рис.1.11 чувствительность в нашем обзоре по длинным данным от несколь-

ких раз до порядка лучше чувствительности в обзоре LOTAAS. Чем меньше период пульсара и чем больше его мера дисперсии, тем меньше выигрыш по чувствительности. Для проверки были взяты все открытые в LOTAAS пульсары, попадающие в площадку вне зависимости от их периода и меры дисперсии. Всего их оказалось 33. Эти пульсары имеют P_0 от 33 мс (J1658+36) до 2.42с (J0349+23) и DM от 3.05 пк/см³ (J1658+36) до 130.56 пк/см³ (J2006+22). Часть пульсаров уже наблюдалась нами ранее, часть повторно детектирована в этом обзоре. Для части пульсаров не было обнаружено гармоник в суммированных спектрах мощности, полученных по коротким данным. Для этих пульсаров мы провели слепой поиск по длинным данным, исходя из известной координаты и пытаюсь обнаружить пульсар так же, как это делается для пульсаров при поиске.

На Рис.1.15 значками разного цвета показаны пульсары из нашего обзора и обзора LOTAAS, попадающие в площадку. Всего на рисунке показано местоположение 60 пульсаров. Мы не смогли зарегистрировать излучение пульсара J1916+32 ($P=1.1374$ с; $DM=83.9$ пк/см³; $W_{50}=23$ мс; $b=+9.4^\circ$; [40]), открытого в обзоре LOTAAS. На рисунке среднего профиля в работе [40] видно, что импульс узкий и визуально его рассеяние не наблюдается несмотря на большую меру дисперсии. В работе [42] приведены оценки плотности потока для пульсара J1916+32 на частотах от 128 МГц до 1532 МГц: $S_{128}=3.0$ мЯн; $S_{167}=2.1$ мЯн; $S_{334}=1.7$ мЯн; $S_{1532}=0.08$ мЯн. Спектральный индекс был определен как $\alpha=1.3$. Оценка ожидаемой плотности потока пульсара J1916+32 в наших наблюдениях $S_{111}=3.6$ мЯн. По формуле 1.1 можно оценить ожидаемую чувствительность в направлении пульсара J1916+32, учитывая реальную температуру фона, известную ширину импульса, положение пульсара между лучами БСА, зенитную поправку, а также суммирование спектров мощности. Температура фона была пересчитана в предположении $T \sim \nu^{-2.55}$ [56]. Наблюдения температуры фона в работе [56] проводились на частоте 178 МГц, то есть близко к частоте 111 МГц, и это значит, что при пересчете температуры на нашу частоту погрешности будут минимальными по сравнению с пересчетами карт температур, взятых из высокочастотных наблюдений. Ожидаемая температура фона в направлении на пульсар составляет $T_f=(178/111)^{2.55} \cdot 360=1200$ К, а $T_{sys}=1500$ К. С учетом известной ширины среднего профиля, времени опроса и предполагаемого рассеяния можно оценить $W_e=74$ мс и ожидаемое $S_{min}=6.6$ мЯн. При суммировании спектров мощности чувствительность возрастает в 36 раз и

$S_{min_sum}=6.6/36=0.18$ мЯн. Поправки за особенности антенны увеличат это значение в 1.4 раза и окончательно мы получаем $S_{min_sum}=0.26$ мЯн. Так как S_{min_sum} относится к обнаружению пульсара на уровне $S/N=6$, то максимальная высота первой гармоники пульсара J1916+32 может достигать до $S/N=(3.6/0.26)*6=83$. Сильная переменность излучения в этом пульсаре маловероятна. В работе [42] приведено больше 50 измерений времени прихода импульсов пульсара, равномерно распределенных на интервале 2017 и 2018 гг.

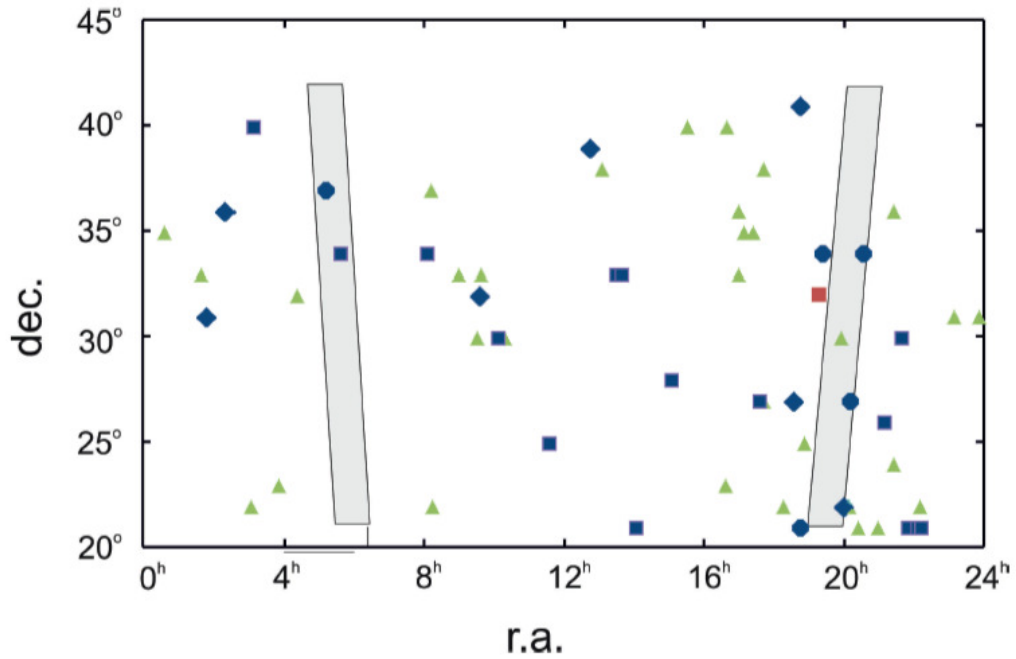


Рисунок 1.15 — Зелеными треугольниками отмечены пульсары, зарегистрированные и в нашем обзоре, и в обзоре LOTAAS. Синие кружки — это новые пульсары, найденные в этом обзоре и показанные в Таблице 4. Синие ромбы и квадраты — это пульсары и вращающиеся транзиенты, детектированные в наших обзорах ранее. Красный квадрат — это пульсар J1916+32, обнаруженный в обзоре LOTAAS, но не детектированный у нас. На вертикальной и горизонтальной осях показаны склонение и прямое восхождение пульсаров. Серым цветом на рисунке схематически изображена плоскость Галактики в пределах $|b|<10^\circ$. Список пульсаров, отмеченных на рисунке, можно посмотреть в Приложении 1. Рисунок взят из [41].

На момент публикации статьи нам не удалось найти причины, по которой в наших записях не регистрируется пульсар J1916+32 (позднее было выяснено, что произошла путаница с переключением лучей, и после этого этот пульсар

был нами найден). Так как в тестовой площадке в слепом поиске не найден всего один из 33 LOTAAS пульсаров, значит, мы видим 97% новых пульсаров из этого обзора вне зависимости от их P_0 и DM . Заметим также, что в этой же площадке находится 11 наших новых пульсаров, а всего на Рис.1.15 показано 20 новых пульсаров и транзиентов, открытых в наших обзорах, но не обнаруженных в обзоре LOFAR. Это вновь указывает на более высокую чувствительность обзора на БСА ФИАН по сравнению с LOTAAS.

Дополнительная проверка реальной чувствительности нашего обзора была сделана по ATNF пульсарам, попадающим в площадку $+21^\circ < \delta < +42^\circ$ и имеющим $P_0 > 0.5$ с и $DM < 100$ пк/см³. В каталоге ATNF на конец 2020 года в площадке числится 100 пульсаров. Пульсары J0139+33, J0302+2252, J1132+25, J1336+33, J1502+28, J2209+22, J2225+3530, согласно ATNF, являются RRAT и их регулярное (пульсарное) излучение пока не обнаружено. Эти 7 RRAT исключены из списка, по которому определяется доля обнаруженных пульсаров. Из оставшихся 93 пульсаров у 13 пульсаров в суммированных спектрах мощности, полученных по коротким данным, периодическое излучение не зарегистрировано. 11 пульсаров (J0927+2345, J1503+2111, J1912+2104, J1929+2121, J1931+30, J1946+24, J2015+2524, J2037+3621, J2044+28, J2111+2106, J2307+2225) из этих 13 не обнаружены и в LOTAAS. Семь пульсаров из 13 имеют в ATNF оценки плотности потока на 400 МГц. Ожидаемые плотности потоков на 111 МГц при пересчете со спектральным индексом 1.7 показывают значения от 3.5 до 53 мЯн с медианным значением плотности потока около 18 мЯн. То есть почти все источники должны обнаруживаться на БСА3 в одиночных сеансах наблюдений.

Если считать, что не удастся зарегистрировать 13 пульсаров из 93, то доля обнаружений в слепом поиске определяется как 86%. По-видимому, можно исключить из этих 13 пульсаров 11, не зарегистрированных ни на БСА ФИАН, ни на LOFAR, предполагая, что по каким-то объективным причинам эти пульсары не наблюдаются в метровом диапазоне. Тогда остается всего 2 пульсара из 93, которые не удастся зарегистрировать на БСА. В этом случае доля ATNF пульсаров, обнаруживаемых слепым поиском в нашем обзоре, возрастает до 97.8%, что совпадает с долей не обнаруженных LOTAAS пульсаров. Для выяснения причин, по которым у 11 пульсаров не обнаруживается периодическое излучение в метровом диапазоне, требуется специальное исследование. В первую очередь нужны многочастотные одновременные наблюдения этих пульсаров.

1.4 Поиск пульсаров по данным обзора с высоким частотно-временным разрешением на склонениях $-9^\circ < \delta < +55^\circ$.

Представляемый обзор выполнен по данным с высоким частотно-временным разрешением на антенне БСА3. Эта антенна, как уже говорилось, имеет 128 неуправляемых лучей и перекрывает склонения от -9° до $+55^\circ$. Эффективная площадь БСА3 в направлении на зенит равна 47 000 кв.м. (0.65 от геометрической площади), что делает эту антенну одним из самых больших в мире телескопов, работающих в метровом диапазоне длин волн. Центральная частота приема радиотелескопа - 110.3 МГц, полная полоса приема равна 2.5 МГц. Время опроса точки составляет 12.5 мс. Площадка со склонениями $+42^\circ < \delta < +55^\circ$ в наших обзорах ранее не обрабатывалась.

Поиск пульсаров проводился с помощью спектров мощности, получаемых за каждую наблюдательную сессию (одна наблюдательная сессия в день). В спектре мощности информация о фазе импульса теряется, а период пульсара отражается в виде гармоник, всегда находящейся в одной и той же точке массива, содержащего спектр. Если в записи есть пульсар, то при суммировании спектров за разные дни будет увеличиваться S/N гармоник, соответствующих его периоду [39].

Мы последовательно посчитали и просуммировали спектры мощности, полученные по данным с высоким частотно-временным разрешением на всех регистраторах за период 2014-2022 годы. Большая оперативная память нового сервера позволила использовать для счёта виртуальную файловую систему, что резко сократило время обработки данных. Программа обрабатывает каждый час отдельно, последовательно идя по всем дням года, создавая спектры мощности для определённого часа и прибавляя их к соответствующим суммарным спектрам. Хранятся суммарные спектры для каждого года, а промежуточные данные (за отдельные сессии) не сохраняются. При обработке одного часа наблюдений по одному регистратору образуется 26880 файлов, общий объем которых составляет около 100 Гб. Каждый файл содержит спектры мощности для определённой координаты по прямому восхождению (1.5-минутный отрезок указанного часа), склонению (соответствует одному из 48 лучей антенны) и определённой ширине импульса. В каждом файле лежат полученные массивы спектров мощности для всех перебираемых ДМ. Таким образом, для счёта одного часа наблюдений требуется около 200 Гб оперативной памяти, т.к.

одновременно в памяти находятся массивы спектров мощности для текущего дня, и суммарные массивы, к которым каждый раз прибавляются полученные спектры за текущий день. Суммирование спектров происходит в оперативной памяти, и это радикально сокращает время обработки, т.к. после обработки очередного дня не требуется чтение и запись на жесткий диск. Полученные суммированные спектры записываются на диск раз в полчаса, чтобы не потерять их в случае сбоя системы. Спектры мощности считаются в многопоточном режиме, при этом используются все 128 доступных потоков. Счёт распараллеливается по координатам. При таком алгоритме на счёт суммарного спектра за год для одного часа одной площадки уходит около 5 часов.

После того, как суммарные спектры для каждого года посчитаны, мы суммируем их по всем годам. В итоге для каждого направления на небе мы получаем около 1800 спектров мощности, просуммированных за весь интервал наблюдений. Это спектры мощности для разных перебираемых мер дисперсий $0 < DM < 1000$ пк/см³ и ширины импульсов $12.5\text{мс} < W_e < 400\text{мс}$. Полученные спектры мощности просматриваются визуально с помощью программы. Как выглядят просматриваемые карты было описано выше. На карте, то есть на одном рисунке, представляются все спектры, соответствующие одному направлению на небе. Карты просматриваются отдельно для каждого направления на небе. Мы считали, что пульсар найден, если он виден в одном или двух соседних лучах и С/Ш самой высокой гармоники, либо суммы гармоник, больше 8. Таким образом в ходе обзора в слепом поиске был зарегистрирован 331 пульсар. Из них 287 - это известные пульсары, включающие в себя и все те пульсары, которые ранее были найдены на БСА ФИАН. Список этих известных пульсаров приведен в Приложении 2. Карты P/DM этих пульсаров можно посмотреть на нашем сайте <https://bsa-analytics.prao.ru/en/pulsars/known/>, а их исследование будет проведено позднее. В проведенном обзоре обнаружено 45 новых пульсаров.

На Рис.1.16 представлен набор карт и графиков, генерируемых программой обработки, полученных для слабого и сильного новых пульсаров (J0553+41, J2015+27). Пульсары хорошо видны на картах P/DM (левые панели на рисунке). Гармоники этих пульсаров, в том числе имеющие $S/N < 4$, видны на спектрах мощности (средние панели на рисунке). Меры дисперсии определяются по максимуму зависимости $(S/N)/DM$, где S/N отражает высоту гармоники в спектре мощности для разных DM (правые панели на рисунке). Для пульсара J0553+41 первые две гармоники достигают $S/N=6$. При некогерентном сложении

нии гармоник, видимых на спектре мощности, S/N вырастает до 10.8. На карте с J2015+27, где пересечение линий P и DM указывает на пульсар, виден еще один пульсар, одновременно попавший в диаграмму направленности БСА3. Это известный пульсар J2018+2839 ($P=0.5579$ с и $DM=14.1$ пк/см³), наблюдаемый в боковом лепестке БСА.

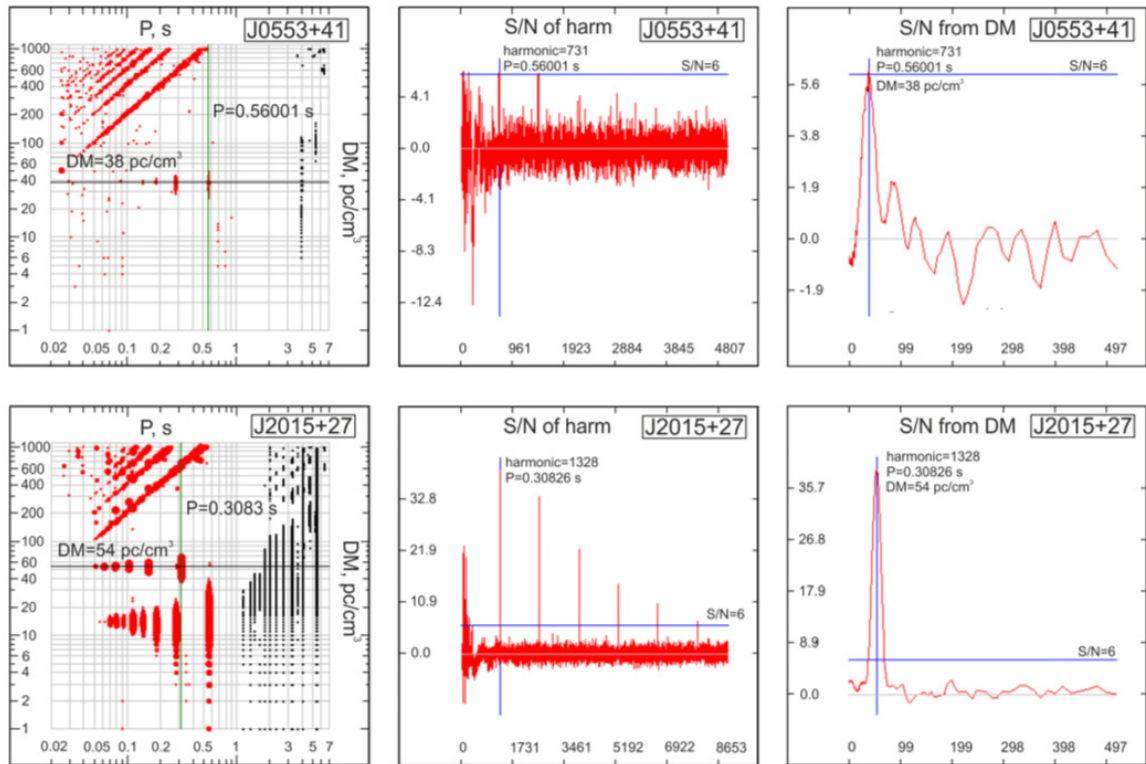


Рисунок 1.16 — На картах, создаваемых программой обработки, представлены пульсары J0553+41 (верхний ряд рисунков) и J2015+27 (нижний ряд рисунков). Пересечение горизонтальной и вертикальной линий на левых панелях указывает на DM и P пульсаров, видимых на карте. Средние панели показывают спектры мощности. В левой части спектров мощности видны низкочастотные шумы, которые не удалось удалить при вычитании базовой линии. Правые панели представляют зависимость высоты гармоник в спектре мощности от проверяемой DM . На средних и правых панелях на вертикальных шкалах показан S/N . Горизонтальные шкалы на средних и правых панелях показывают номер точки в спектре мощности и DM пульсара. У пульсара J0553+41 на спектре мощности видны 5 гармоник, три из них имеют $S/N=3.5-4$. У пульсара J2015+27 видны 6 гармоник. Рисунок взят из [57].

Таблица 5 — Характеристики новых пульсаров. Таблица взята из [57].

Имя	α_{2000}	δ_{2000}	P	DM	S/N
J0129+36	01 ^h 29 ^m 30 ^s	36° 05' ±10	1.089 ±0.005	54±2	10.9(1)
J0149+29	01 ^h 49 ^m 00 ^s	29° 10' ±15	2.654 ±0.010	34.5±2	10.6(6)
J0227+34	02 ^h 27 ^m 00 ^s	34° 01' ±15	1.2443 ±0.005	27±2	14.3(4)
J0553+41	05 ^h 53 ^m 30 ^s	41° 20' ±15	0.5600 ±0.001	38±2	6.4(2)
J0628+07	06 ^h 27 ^m 00 ^s	07° 08' ±10	0.2381 ±0.0005	138±3	20.1(1)
J0734+14	07 ^h 34 ^m 30 ^s	14° 43' ±15	1.772 ±0.005	50±4	8.2(4)
J1003+41	10 ^h 03 ^m 30 ^s	41° 03' ±15	0.8804 ±0.003	30±3	6.8(1)
J1105+37	11 ^h 05 ^m 00 ^s	37° 41' ±15	0.8747 ±0.003	36±3	9.3(3)

В Таблице 5 представлено несколько обнаруженных пульсаров, всю таблицу можно посмотреть в параграфе 5 первой главы. В колонках 1-3 даны имя пульсара и его координаты по прямому восхождению и склонению. Точность координаты по прямому восхождению для всех пульсаров ±1.5 минуты. В колонках 4 и 5 приведены P и DM пульсаров. В колонке 6 указано значение S/N для самой высокой гармоники в спектре мощности, а в скобках приведен номер этой гармоники. Как показывает обработка, первые гармоники часто попадают на область низкочастотного шума в спектрах мощности, и их значение в единицах S/N определяется некорректно. Иногда часть гармоник в спектрах мощности отсутствует. Мы указываем значение S/N, так как оно косвенно говорит о плотности потока пульсара и может помочь наблюдателям при проведении подтверждающих обнаружение пульсара наблюдениях. Исходя из шумовой дорожки, определяемой фоном Галактики, S/N=6 соответствует интегральной плотности потока 0.2-2 мЯн для секундных пульсаров на частоте 111 МГц и зависит от периода пульсара, его высоты над антенной в момент кульминации, температуры фона в направлении пульсара, координаты пульсара относительно координаты неподвижного луча БСА3. Эти оценки очень грубые, но позволяют примерно оценить ожидаемую плотность потока при проведении наблюдений на других радиотелескопах.

Комментарии к некоторым из найденных в этом обзоре пульсаров:

J0227+34. При подготовке публикации к печати была найдена работа [58] с опубликованным пульсаром J2027+3356, имеющем P=1.2401 с и DM=27 пк/см³.

В пределах ошибок по координатам, P и DM источники совпадают. По-видимому, мы независимо обнаружили один и тот же пульсар;

J0628+07. В работе [59] указан пульсар J0627+0706, имеющий $DM=138.25$ пк/см³, $P=0.4758$ с. Его координаты и DM близки к полученным для найденного нами пульсара. Период J0628+07 мы оцениваем из спектра мощности как 0.2381с, и он в два раза меньше, чем в работе [59]. Мы полагаем, что J0628+07 и J0627+0706 — это один и тот же объект, период которого нуждается в независимой проверке;

J1556+00. В работе [60] есть RRAT J1555+01, имеющий $DM=16-20$ пк/см³. Близость координат и меры дисперсии нового пульсара и транзиента говорит о том, что, скорее всего, открыто периодическое излучение RRAT;

J2038+35. Нами получены оценки $P=0.0801$ с и $DM=58$ пк/см³. В работе [61] говорится об обнаружении пульсара J2038+35 с $P=0.16$ с и $DM=57.9$ пк/см³. Периоды отличаются в два раза, а меры дисперсии и координаты близки. Скорее всего обнаружен один и тот же объект, период которого нуждается в независимой проверке;

J2048+12. В работе [62] говорилось об обнаружении RRAT J2047+12, имеющего $DM=36\pm 2$ пк/см³. Близость координат и DM говорит о вероятном обнаружении периодического излучения RRAT;

J2203+21. В работе [60] говорилось об обнаружении RRAT J2202+21, имеющего $DM=17\pm 2$ пк/см³. По-видимому, нами обнаружено регулярное излучение этого транзиента.

Помимо P и DM средний профиль пульсара является одной из базовых характеристик. При сложении нескольких сотен или нескольких тысяч периодов форма среднего профиля становится устойчивой и может использоваться для построения моделей излучения [46]. Однако, в случае поиска пульсаров с помощью суммированных спектров мощности, получение среднего профиля пульсара в данных БСА за один сеанс наблюдений может оказаться не решаемой задачей. Для получения среднего профиля необходимо найти сессию, в которой принимаемый сигнал был достаточно сильным, чтобы его увидеть. Например, для пульсаров, располагающихся на склонениях $-9^\circ < \delta < +42^\circ$, использовались наблюдения на интервале 8.3 года (около 3000 сессий для каждого направления). Согласно работе [41] S/N увеличивается в суммированном спектре мощности за 8 лет примерно в 36 раз. У сильнейшего из найденных нами в нашем обзоре пульсаров (J2015+27) $S/N=54.2$ для самой высокой гармоники.

Для этого пульсара в отдельных сессиях средняя высота гармоник должна быть $S/N=54.2/36\approx 1.5$. Это означает, что при переборе P и DM в сессиях длительностью 3.5 минуты S/N импульса в среднем профиле может быть слишком мал, чтобы можно было быть уверенными в получении профиля. В то же время пульсары - это источники с переменным излучением. В силу собственной переменности пульсаров и переменности из-за межзвездных мерцаний, возможно, в какие-то дни можно получить средний профиль пульсара, даже если в целом пульсар слабый.

Оценки P и DM пульсара, полученные из спектра мощности, имеют погрешности. Для получения среднего профиля пульсара нужно перебирать значения P и DM в пределах погрешностей. Мы провели такой поиск для всех новых пульсаров. Для каждого тестируемого значения P и DM был получен средний профиль за сеанс наблюдений. Всего при проверке одной сессии получалось больше 400 средних профилей пульсара. Запоминался номер точки с максимальным значением (в единицах S/N) внутри полученного профиля и производился кольцевой сдвиг до тех пор, пока точка максимума не оказывалась на середине профиля. Горизонтальная шкала профиля представлена на экране программы визуализации в значениях фазы, поэтому середина профиля соответствует фазе 0.5. В модернизированной программе визуализации можно одновременно вывести на экран все рисунки средних профилей за сеанс, либо любой отдельный профиль. Для реального среднего профиля на общем рисунке со всеми средними профилями максимальные S/N должны быть на картинках с близкими P и DM . Для удобства просмотра большого количества картинок со средними профилями картинку с максимальным значением S/N программа визуализации окрашивает в розовый цвет, картинка со следующим значением окрашена в зеленый цвет, а картинки со следующими тремя значениями высоты среднего профиля окрашены в светло-зеленый цвет. Таким образом, концентрация в одном месте разноцветных картинок профилей косвенно говорит о том, что реальный средний профиль получен.

В программе есть возможность сортировки сеансов по максимальному значению S/N полученных в нём средних профилей, и мы выводим на экран рисунки средних профилей в порядке убывания S/N в сессиях за разные дни. Поэтому, чтобы убедиться в существовании или отсутствии среднего профиля в примерно 3000 имеющихся сессий, достаточно просмотреть всего лишь несколько десятков дней с наилучшими S/N .

Если значение максимума в среднем профиле $S/N > 6-7$, то сомнений в правильности получения профиля, как правило, не возникает. У истинного среднего профиля цветные картинки концентрируются на близких значениях P и DM , на профиле могут быть видны детали. Чем дальше P и DM от лучшего профиля, имеющего максимальное значение S/N , тем меньше становится высота средних профилей. На каком-то расстоянии от значения P и DM средние профили могут вообще исчезнуть. Если высота среднего профиля мала ($S/N < 6$), то проверяются косвенные признаки. Полуширина профиля не может быть меньше, чем значения из ожидаемого межзвездное рассеяния и дисперсионного сглаживания в частотных каналах. Цветные картинки должны концентрироваться вблизи определённых значений P и DM . Фазы максимумов профилей для близких мер дисперсий должны совпадать, это легко увидеть по номерам точек максимумов профилей, они должны быть одинаковы. Средние профили с максимумами $S/N < 4$ не рассматривались.

Для открытых в обзоре пульсаров мы построили средние профили для всех наблюдательных сессий. На Рис.1.17 приведен фрагмент карты, выдаваемой программой визуализации.

Всего удалось получить средние профили для 8 пульсаров из 45 проверяемых. На Рис.1.18 приведены эти средние профили. Исходя из температуры фона в направлении пульсара, известной эффективной площади и оценки S/N была оценена пиковая плотность потока (S_p). Так как для получения этих профилей перебирались тысячи сеансов наблюдений и искались профили с максимальным S/N , то S_p должна быть близка к максимуму излучения этих пульсаров на частоте 111 МГц.

Как уже говорилось выше, всего в этом обзоре в слепом поиске было зарегистрировано 286 известных пульсаров. Из них в площадках с координатами $-9^\circ < \delta < +21^\circ$ и $+21^\circ < \delta < +42^\circ$ добавились 63 пульсара, которые в ранней обработке по 6-канальным данным не обнаруживались. Площадка со склонениями $+42^\circ < \delta < +55^\circ$ ранее не обрабатывалась, в ней найдено 39 известных пульсаров.

Согласно данным ATNF на май 2023 общее количество пульсаров с параметрами $P > 0.025$ с, $DM < 200$ пк/см³ и $-9^\circ < \delta < +55^\circ$, которые могут быть обнаружены нами на БСА ФИАН, составляет 740. Однако в слепом поиске зарегистрирован всего 331 известный пульсар. При этом мы считаем [41], что имеем самую высокую в мире чувствительность при поиске секундных пульса-



Рисунок 1.17 — Для пульсара J1556+00 приведены три фрагмента средних профилей с разными P и DM из набора всех профилей, построенных программой визуализации. Сверху по горизонтали показана тестируемая мера дисперсии DM , слева по вертикали – тестируемый период P . Внутри картинки среднего профиля сверху вниз показаны проверяемые P и DM , значение максимума в профиле в единицах S/N (max), номер точки в профиле, на которую пришелся видимый максимум (num). При поиске по суммированным спектрам мощности для J1556+00 были получены значения $P=0.5774$ с, $DM=22\pm 4$ пк/см³. При получении средних профилей перебор периодов проводился от 0.57658 с до 0.57818 с (верхняя и нижние панели), перебор DM от 16 пк/см³ до 22 пк/см³ (крайние левая и правая колонки). При проверке наблюдательных сессий обнаружено, что максимумы средних профилей концентрируются вокруг $P=0.5769$ с и $DM=19.5\pm 1.5$ пк/см³. На средней панели рисунка в центральной части видны окрашенные средние профили, указывающие на обнаружение пульсара. На верхней панели виден расплывшийся из-за некорректного периода ($P=0.57658$ с) профиль. На нижней панели при проверке периода $P=0.57818$ с профиль полностью исчез.

Рисунок взят из [57].

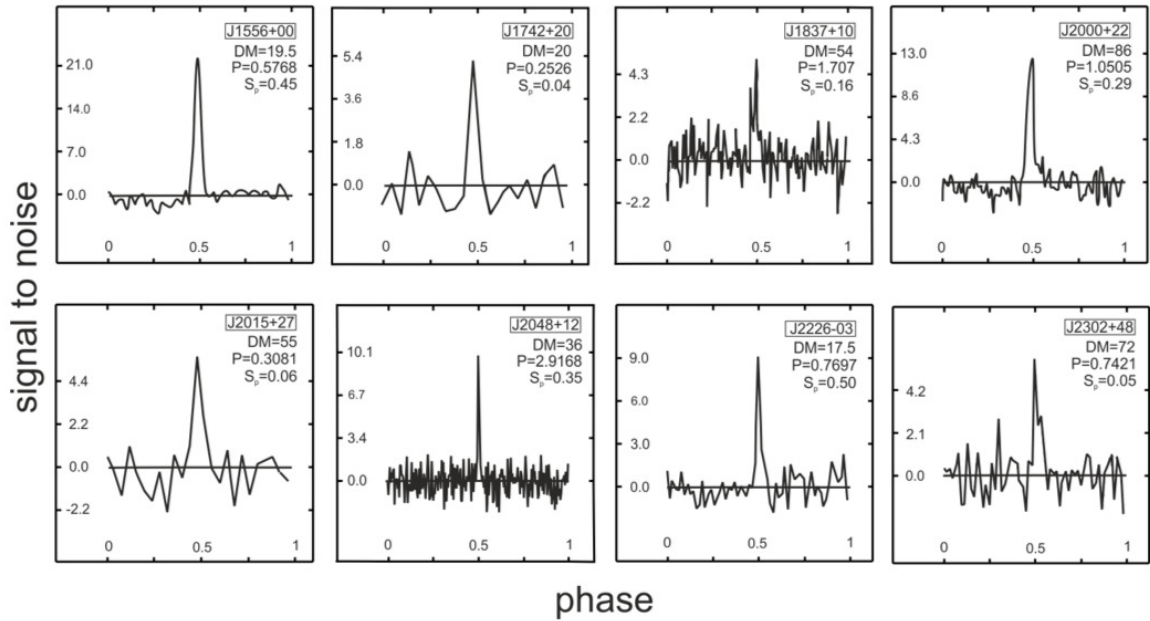


Рисунок 1.18 — На рисунке показаны средние профили пульсаров. В верхнем правом углу картинок приведены имена пульсаров, P , DM и S_p . Период и мера дисперсии взяты из Табл.5. Оси на рисунке такие же, как на Рис.1.17.

Рисунок взят из [57].

ров в метровом диапазоне длин волн. Полученные результаты поиска кажутся странными.

Расчеты чувствительности в работе [41] показывают, что наша чувствительность должна быть максимальной лишь при поиске пульсаров с $P > 0.5$ с и $DM < 100$ пк/см³. При $P < 0.5$ с и $DM > 100$ пк/см³ чувствительность резко падает и должны появляться пульсары, которые не обнаруживаются в слепом поиске. Тем не менее, если говорить об известных пульсарах, в слепом поиске были найдены пульсары J1951+3001 ($P=2.7889$ с; $DM=249$ пк/см³) и J0534+2200 ($P=0.0333$ с; $DM=56.7$ пк/см³). Для новых пульсаров минимальный период наблюдался у пульсара J2038+35 ($P=0.0801$ с; $DM=58$ пк/см³), а максимальная DM - у пульсара J2043+31 ($P=0.9368$ с; $DM=145$ пк/см³).

Если чувствительность действительно такая, как мы считаем, то в нашем обзоре должны детектироваться все известные пульсары. В 2009 г. [63] были сделаны оценки, которые показали планируемое открытие 900 пульсаров в обзоре LOTAAS, проводимом на радиотелескопе LOFAR. С учетом более высокой чувствительности на БСА и сопоставимой площади обзора ожидаемое количество открытий пульсаров на БСА3 должно быть больше, чем 900.

Проведем анализ обнаруживаемых в слепом поиске пульсаров, попадающих в площадки $-9^\circ < \delta < +42^\circ$ (Таблицы 6 и 7). В Таблице 6 показано количество пульсаров на разных мерах дисперсии DM. В первой колонке таблицы даны DM. В колонках 2-4, 5-7, 8-10, 11-13 приведено количество пульсаров, отобранных с разными критериями по мерам дисперсии:

$DM < 100 \text{ пк/см}^3$, $P > 0.5\text{с}$, $+21^\circ < \delta < +42^\circ$, $|b| > 10^\circ$ (пульсары вне плоскости Галактики);

$DM < 200 \text{ пк/см}^3$, $P > 0.5\text{с}$, $+21^\circ < \delta < +42^\circ$;

$DM < 200 \text{ пк/см}^3$, $P > 0.025\text{с}$, $+21^\circ < \delta < +42^\circ$;

$DM < 200 \text{ пк/см}^3$, $P > 0.025\text{с}$, $-9^\circ < \delta < +42^\circ$.

В колонках 2, 3, 4 показано количество открытых в наших обзорах пульсаров с регулярным радиоизлучением, включая текущий, вне плоскости Галактики ($\delta < +21^\circ$);

5,6,7 - количество детектируемых нами пульсаров из каталога ATNF на склонениях $+21^\circ < \delta < +42^\circ$;

8,9,10 - количество не детектируемых нами пульсаров из каталога ATNF на склонениях $+21^\circ < \delta < +42^\circ$

11,12,13 – количество не детектируемых нами пульсаров из каталога ATNF на склонениях $-9^\circ < \delta < +42^\circ$

В итоговой строке приведено количество пульсаров в столбце. Данные для таблиц были взяты из каталога ATNF и на нашем сайте <https://bsa-analytics.prao.ru/en/>.

В Таблице 7 показано количество пульсаров, попадающих в площадку обзора в зависимости от их периодов. В первой колонке приведены границы периодов пульсаров. В колонках 2-4, 5-7 и 8-10 показано количество пульсаров, отобранных по периодам с разными критериями:

$DM < 200 \text{ пк/см}^3$, $P > 0.5\text{с}$, $+21^\circ < \delta < +42^\circ$;

$DM < 200 \text{ пк/см}^3$, $P > 0.025\text{с}$, $+21^\circ < \delta < +42^\circ$;

$DM < 200 \text{ пк/см}^3$, $P > 0.025\text{с}$, $-9^\circ < \delta < +42^\circ$.

Критерии выбора пульсаров для колонок 2-4, 5-7 и 8-10 в Таблицы 7 повторяют критерии для колонок 5-7, 8-10, 11-13 в Таблице 6

Помимо указанного выше, распределение новых пульсаров в плоскости и вне плоскости Галактики отличается от выборки секундных ATNF пульсаров.

Таблица 6 — Таблица взята из [57].

DM/N	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0-25	17	11	2	17	14	5	14	19	12	24	41	35
26-50	18	23	4	22	27	4	23	30	15	38	58	64
51-75	7	12	4	9	18	7	5	22	14	10	43	64
76-100	3	2	0	9	7	4	10	11	8	12	24	61
101-125	0	0	0	1	3	4	1	2	6	1	3	42
126-150	0	0	0	1	3	5	1	3	10	2	4	46
151-175	0	0	0	1	1	1	1	1	3	1	5	23
176-200	0	0	0	0	1	9	0	1	11	0	1	60

Таблица 7 — Таблица взята из [57].

P/n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.025-0.1	-	-	-	1	3	9	1	5	42
0.1-0.25	-	-	-	1	5	7	4	8	27
0.25-0.5	-	-	-	7	18	13	10	51	79
0.5-0.75	10	17	13	8	16	13	11	27	57
0.75-1	16	12	6	10	10	7	20	24	51
1-2	28	37	14	22	31	21	33	53	91
2-3	5	3	4	4	3	4	6	8	32
>3	1	5	3	2	3	5	3	3	16

Так в плоскости Галактики $|b| < 10^\circ$ находятся 422 (57%) ATNF пульсара. Нами обнаружено 89 секундных пульсаров, из них в плоскости Галактики - 22 (25%). Для RRAT, обнаруженных на БСАЗ, наблюдается примерно то же соотношение: из 48 обнаруженных транзиентов 11 находятся в плоскости Галактики (23%).

За время проведения всех обзоров на БСА ФИАН, включая текущий, открыто около 130 секундных пульсаров и RRAT, что в 7 раз меньше ожидаемого обнаружения более чем 900 новых пульсаров. То есть существует большой дефицит пульсаров в метровом диапазоне. Самая высокая чувствительность и наименьшее количество помех в нашем обзоре соответствует площадке со склонениями $+21^\circ < \delta < +42^\circ$ после вырезания плоскости Галактики ($|b| > 10^\circ$) и для пульсаров с периодами $P > 0.5\text{c}$ [41]. На гистограмме (левая панель Рис.18) отмечены все пульсары из этой площадки. Высота колонки показывает общее

количество пульсаров. Черным цветом показаны пульсары, открытые в наших обзорах, темно-серым цветом показаны пульсары из каталога ATNF, найденные нами слепым поиском, светло-серым цветом показаны ATNF пульсары, которые обнаружить не удалось. Из 103 пульсаров, попавших в площадку, удалось детектировать 93 известных пульсара (90.3%). Из детектированных пульсаров половина открыта на БСАЗ. Для сравнения отметим работу, сделанную на 64-метровом телескопе в Парксе [51], согласно которой в слепом поиске детектировано 94.2% известных пульсаров, что близко к нашим значениям.

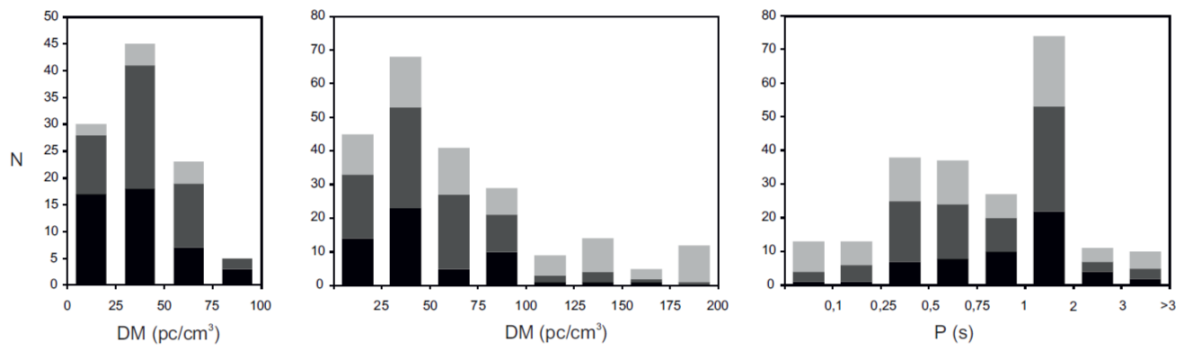


Рисунок 1.19 — На левой и средней панелях представлены колонки 2-4 и 8-10 из Табл.6, на правой панели представлены колонки 5-7 из Табл.7. На вертикальной шкале отложено общее количество пульсаров (нижняя строка в Табл. 6 и 7), на горизонтальной шкале - границы DM (левая и средняя панели) и границы периодов (правая панель). Рисунок взят из [57].

При включении плоскости Галактики появляются пульсары с $DM > 100$ пк/см³ и уменьшается процент детектируемых известных пульсаров. На $DM < 100$ пк/см³ удалось детектировать 86% известных пульсаров. Из них примерно половина пульсаров были открыты на БСА ФИАН. На мерах дисперсии $100 < DM < 200$ пк/см³ удалось детектировать меньше половины (36.7%) известных пульсаров, и здесь число открытых на БСА ФИАН пульсаров упало до трети от этого количества.

Колонки 8-10 Табл.6 и средняя панель Рис.1.19 показывают, что если добавить в выборку пульсары с периодами до 0.025с, в площадке $+21^\circ < \delta < +42^\circ$ вновь падает процент обнаруживаемых пульсаров. На $DM < 100$ пк/см³ мы видим 73.2% известных пульсаров. При мерах дисперсии $100 < DM < 200$ пк/см³ количество обнаруживаемых пульсаров падает до 25%. При проверке периодов

пульсаров, колонки 5-7 в Табл.7 и правая панель Рис.1.19, видно, что самый большой процент потерь пульсаров приходится на периоды $P < 0.25\text{с}$ и $P > 3\text{с}$.

При добавлении площадки $-9^\circ < \delta < +21^\circ$, где фиксируется много помех, количество детектируемых нами ATNF пульсаров резко уменьшается. На $DM < 100 \text{ пк/см}^3$ удалось детектировать всего половину (52.7%) известных пульсаров. На $DM > 100 \text{ пк/см}^3$ удалось детектировать только 9% известных пульсаров.

Таким образом Табл.6 и 7, а также гистограммы на Рис.1.19 ясно показывают, что в основном нами не обнаруживаются пульсары с $DM > 100 \text{ пк/см}^3$, $P < 0.25\text{с}$ и $P > 3\text{с}$. Самая высокая чувствительность нашего обзора достигается для пульсаров с мерами дисперсии $DM < 100 \text{ пк/см}^3$ и периодами $0.25 < P < 3\text{с}$ для пульсаров в площадке $+21^\circ < \delta < +42^\circ$.

По нашему мнению, есть пять основных факторов, которые могут объяснить дефицит пульсаров в нашем обзоре:

- Работа с ожидаемым обнаружением 900 новых пульсаров в обзоре LOTAAS опубликована в январе 2010 года [63]. При получении этой оценки авторы, вероятнее всего, использовали пульсары, внесенные в ATNF к 2009 году. Следовательно, при учете наблюдаемого дефицита в выборку «новых» пульсаров нужно добавить все ATNF пульсары, детектируемые нами и опубликованные в работах начиная с 2009 года. Таких пульсаров оказалось 96, из них 41 пульсар был обнаружен в обзоре на БСА3. Помимо этого, к списку нужно добавить 45 новых пульсаров из представляемого обзора и примерно 50 открытых RRAT. То есть общее количество пульсаров, обнаруженных после 2009 года, около 200;

- Часть пульсаров могут иметь уплощение в спектре или завал. Оценка средней величины спектрального индекса на низких частотах составляет $\alpha = 1.4-1.6$; $S \sim \nu^{-\alpha}$ ([64], [65]). Согласно [55] (Рис.С2 в приложении) почти половина из 158 представленных в работе пульсаров показывают уплощение или завал в спектре в диапазоне 100-150 МГц. При получении оценки среднего спектрального индекса мы перемешаем пульсары с крутыми спектрами и пульсары, имеющие уплощение или завал в спектрах. Если доля слабых пульсаров с завалами или уплощением в спектре велика, то ожидаемые плотности потока от таких пульсаров на частоте 111 МГц могут быть сильно переоценены. В этом случае нашей чувствительности может быть недостаточно для обнаружения какой-то части новых пульсаров;

- Оценки чувствительности нами сделаны исходя из того, что наблюдаемая плотность потока пульсара не меняется со временем. Это заведомо не так. В работе [66] была сделана попытка оценить интегральные плотности потока известных пульсаров, исходя из средних профилей, полученных в отдельные дни, и из высоты гармоник, полученных при суммировании спектров мощности за 2000 наблюдательных сессий. Профили за отдельные дни были получены для сессий, в которых спектры мощности за эти дни показывали максимальный СШ. Оказалось, что средняя за весь срок наблюдений интегральная плотность потока может быть в 5-10 раз меньше по сравнению с плотностью потока в «лучший» день. Поэтому может оказаться, что наша чувствительность выше декларируемой чувствительности в обзоре LOTAAS ([40]) не в 10 раз, как мы ожидаем ([41]), а меньше. В то же время нужно отметить, что чувствительность нашего обзора должна быть выше, чем чувствительность в LOTAAS, так как в слепом поиске мы зарегистрировали все новые пульсары из обзора LOFAR, попавшие в площадку со склонениями $-9^\circ < \delta < +42^\circ$. При этом обнаружен ряд секундных пульсаров, не детектированных в LOTAAS. С другой стороны, при проведении обзора LOTAAS запись сырых данных проводилась на часовых интервалах. Если источник переменный, и в момент записи у него наблюдался минимум излучения, например, из-за рефракционных мерцаний на межзвездной среде, он мог быть потерян при поиске на LOFAR, но может быть обнаружен в повторных наблюдениях;

- Изменение наблюдаемых свойств пульсаров. В работах [67], [68] показаны источники J1107-5907 и J0609+16, которые часть времени ведут себя как обычные пульсары, а часть времени как RRAT. В работе [69] отмечено, что пульсар J0302+2252 виден как обычный пульсар на БСА, а в RRATalog (<http://astro.phys.wvu.edu/rratalog/>; Deneva2016) он считается RRAT. Есть и обратная ситуация. Известные ATNF пульсары J1503+211 ($P=3.3140\text{с}$; $DM=3.26\text{ пк/см}^3$), J2325-0530 ($P=0.8687\text{с}$; $DM=14.9\text{ пк/см}^3$), J2346-0609 ($P=1.1815\text{с}$; $DM=22.5\text{ пк/см}^3$) были обнаружены на БСА по их отдельным импульсам (<https://bsa-analytics.prao.ru/transients/pulsars/>). В то же время при накоплении спектров мощности за 8 лет их регулярное излучение не обнаружено. Это означает, что есть неизвестная доля пульсаров с переходными свойствами, а также есть доля пульсаров, которые на низких частотах могут быть видны как RRAT, а на высоких частотах как обычные пульсары. Пульсары с переменностью и другими свойствами специально отмечены в поиске пульсаров на Arecibo

([70]). В Приложении 3 мы разместили 20 ATNF пульсаров (колонка 7, Табл.6), которые не детектированы в нашем поиске в площадке, обеспечивающей максимальную чувствительность в обзоре ($+21^\circ < \delta < +42^\circ$; $P > 0.5\text{с}$; $DM < 200 \text{ пк/см}^3$). Это могут быть пульсары с сильной переменностью, пульсары с длительными нуллинами, с завалами либо с уплотнением в спектрах, а также пульсары типа RRAT;

- Таблицы 6 и 7 ясно показывают, что в площадке с координатами $+21^\circ < \delta < +42^\circ$ процент теряемых пульсаров мал. В этой площадке можно говорить о регистрации почти всех пульсаров с $DM < 100 \text{ пк/см}^3$ и периодами $0.25 < P < 3\text{с}$. В этой же площадке можно ожидать и обнаружение новых пульсаров на ожидаемых нами уровнях чувствительности. В площадке $-9^\circ < \delta < +21^\circ$ в нашем обзоре теряется половина известных пульсаров. Не имеет значения, по какой причине происходят эти потери, важно то, что гарантия высокой чувствительности обзора распространяется лишь на относительно небольшую площадку, примерно 6500 квадратных градусов, а оценки количества новых пульсаров, полученные [63], относились к обзору LOTAAS, проходившему в площадке размером 20000 квадратных градусов [40].

Долю теряемых пульсаров и причины потерь определить трудно. В настоящее время готовится обработка данных с помощью FFA. Для пульсаров с малой скважностью чувствительность при поиске может вырасти в 5 и более раз (см. Рис.4 в [71]). Разрабатывается также алгоритм автоматического отбора спектров мощности для пульсаров с сильной переменностью. Он позволит отбирать и суммировать спектры мощности лишь для данных, в которых вероятно обнаружение периодического сигнала. После проведения обработки данных этими двумя способами мы надеемся увеличить количество обнаруженных в нашем обзоре секундных пульсаров.

1.5 Найденные в наших обзорах радиопульсары

В Таблице 8 перечислены открытые в наших обзорах, описанных в параграфах 2, 3 и 4, пульсары. В 1 столбце дается имя пульсара, во 2 и 3 – его координаты, прямое восхождение и склонение, на эпоху 2000 года. В 4 и 5 столбцах приведены период P и мера дисперсии DM пульсара. В 6 столбце приведена оценка полуширины импульса пульсара, если она была определена,

в 7 – ссылка на работу, в которой пульсар был обнаружен. Всего в таблице перечислено 79 пульсаров.

Таблица 8 — Характеристики открытых в наших обзорах пульсаров

Имя	α_{2000} <i>h m s</i>	δ_{2000} <i>° ′</i>	P_0 (с)	DM (пк/см ³)	W_e (мс)	источник
J0122+1407	01 22 07	+14 07	1,3885	18 ± 2	30	[37]
J0609+1634	06 09 13	+16 34	0,9458	84 ± 5	45	[37]
J0810+3725	08 10 30	+37 25	1,2483	16 ± 2	35	[37]
J0933+3245	09 33 50	+32 45	0,9616	18 ± 3	30	[37]
J1243+1752	12 43 00	+17 52	1,2165	5 ± 3	200	[37]
J1528+4053	15 28 00	+40 53	0,4764	6 ± 2	110	[37]
J1536+1749	15 36 15	+17 49	0,9333	28 ± 3	20	[37]
J1634+2328	16 34 50	+23 28	1,2087	36 ± 4	40	[37]
J1637+4003	16 37 30	+40 03	0,7675	31 ± 4	35	[37]
J1644+1346	16 44 15	+13 46	1,0989	34 ± 1.5	20	[37]
J1651+1422	16 51 00	+14 22	0,828	48 ± 10		[37]
J1657+3248	16 57 30	+32 48	1,5702	23 ± 2	45	[37]
J1832+2758	18 32 10	+27 58	0,6318	46 ± 3	30	[37]
J1844+4117	18 44 45	+41 17	0,9157	50 ± 10	300	[37]
J1932-0108	19 32 15	-01 08	0,5937	35.5 ± 1.5	25	[37]
J1954+3007	19 54 00	+30 07	1,271	42 ± 2	35	[37]
J2051+1315	20 51 30	+13 15	0,5532	42.5 ± 2.5	120	[37]
J2350+3148	23 50 10	+31 48	0,5081	37.5 ± 2.5	15	[37]
J0305+1127	03 05 50	+11 27	0,8636	26.5 ± 1.5	16	[39]
J0350+2341	03 50 03	+23 41	2,4212	$61 \pm 1,5$	21	[39]
J1740+2728	17 40 17	27 28	1,0582	35 ± 2	21	[39]
J1958+2213	19 58 34	22 13	1,0502	85 ± 3	21	[39]
J2210+2117	22 10 15	21 17	1,7769	45 ± 2	25	[39]
J0109+11	01 09 45	11 32	0,4327	17 ± 2	≤ 25	[41]
J0509+37	05 09 15	37 32	2,4961	30 ± 3	≤ 100	[41]

Имя	α_{2000} h m s	δ_{2000} ° ′	P_0 (с)	DM (пк/см ³)	W_e (мс)	источник
J1844+21	18 44 45	21 51	0,5959	28 ± 3	≤ 200	[41]
J1845+21	18 45 00	21 51	3,7556	50 ± 10	≤ 100	[41]
J1918+17	19 18 00	17 24	0,4196	40 ± 2	≤ 100	[41]
J1921+34	19 21 45	34 07	1,444	85 ± 5	≤ 200	[41]
J2008+27	20 08 15	27 55	1,5218	154 ± 5	≤ 200	[41]
J2029+34	20 29 45	34 37	1,8194	97 ± 5	≤ 400	[41]
J2105+19	21 05 45	19 24	3,5297	35 ± 3	≤ 25	[41]
J2253+12	22 53 15	12 32	0,9793	37 ± 5	≤ 25	[41]
J2333+20	23 33 45	20 18	2,2911	17 ± 5	≤ 100	[41]
J0129+36	01 29 30	36 05	1,089	54 ± 2		[57]
J0149+29	01 49 00	29 10	2,654	$34,5 \pm 2$		[57]
J0227+34	02 27 00	34 01	1,2443	27 ± 2		[57]
J0553+41	05 53 30	41 20	0,56	38 ± 2		[57]
J0628+07	06 27 00	07 08	0,2381	138 ± 3		[57]
J0734+14	07 34 30	14 43	1,772	50 ± 4		[57]
J1003+41	10 03 30	41 03	0,8804	30 ± 3		[57]
J1105+37	11 05 00	37 41	0,8747	36 ± 3		[57]
J1409+49	14 09 30	49 44	1,125	29 ± 2		[57]
J1444+18	14 44 30	18 10	1,1326	$16,5 \pm 1$		[57]
J1515+20	15 15 00	20 51	1,147	$21,5 \pm 2$		[57]
J1556+00	15 56 00	00 52	0,5768	$19,5 \pm 1,5$		[57]
J1730+13	17 30 45	13 05	1,15	32 ± 2		[57]
J1742+20	17 42 45	20 17	0,2526	20 ± 2		[57]
J1754+48	17 54 00	48 46	0,6519	23 ± 2		[57]
J1803+47	18 03 00	47 08	0,3469	$29,5 \pm 1,5$		[57]
J1837+10	18 37 00	10 46	1,707	54 ± 4		[57]
J1848+26	18 48 15	26 29	0,6288	64 ± 2		[57]
J1854+40	18 54 00	40 05	1,748	37 ± 3		[57]
J1916+38	19 16 30	38 48	0,5136	77 ± 4		[57]
J1918+26	19 18 30	26 55	0,7233	113 ± 4		[57]

Имя	α_{2000} h m s	δ_{2000} ° ′	P_0 (с)	DM (пк/см ³)	W_e (мс)	источник
J1937+34	19 37 30	34 04	1,749	98 ±5		[57]
J1940+14	19 40 15	14 37	1,279	70 ±3		[57]
J1948+06	19 48 45	06 02	1,325	61 ±3		[57]
J2000+22	20 00 00	22 13	1,0505	86 ±3		[57]
J2000+04	20 00 15	04 07	0,7768	60 ±6		[57]
J2014+10	20 14 15	10 28	1,14	74 ±4		[57]
J2015+27	20 15 15	27 48	0,3081	55 ±2		[57]
J2031+34	20 31 00	34 19	1,819	105 ±4		[57]
J2038+35	20 38 30	35 19	0,0801	58 ±1		[57]
J2040+20	20 40 00	20 42	0,2905	31 ±2		[57]
J2043+31	20 43 00	31 27	0,9368	145 ±5		[57]
J2048+12	20 48 00	12 58	2,9168	36 ±2		[57]
J2116+37	21 16 30	37 04	0,1459	43 ±2		[57]
J2124+34	21 24 00	34 27	0,4891	84,5 ±2		[57]
J2151+19	21 51 15	19 11	1,036	31 ±2		[57]
J2201+33	22 01 15	33 00	0,9655	78 ±2		[57]
J2203+21	22 03 00	21 34	1,365	17 ±1		[57]
J2226-03	22 26 15	-03 15	0,7697	17.5 ±1.5		[57]
J2229+40	22 29 00	40 26	0,2729	74 ±2		[57]
J2300+52	23 00 30	52 20	0,4265	82 ±4		[57]
J2302+48	23 02 45	48 14	0,7421	72 ±4		[57]
J2305+19	23 05 30	19 40	0,2693	20.5 ±1.5		[57]
J2312+21	23 12 30	21 40	1,256	19 ±3		[57]
J2355+04	23 55 30	04 43	0,9576	13 ±2		[57]

1.6 Поиск радиоизлучения от гамма-пульсаров

В 1970 году была опубликована работа, указывающая на вероятное обнаружение пульсирующего гамма-излучения у пульсара в Крабовидной туманности [72]. До 2009 года гамма-излучение обнаруживалось у пульсаров, первоначально найденных в других диапазонах длин волн. Запущенный в 2008 году орбитальный гамма-телескоп *Fermi*, созданный в том числе и для поиска пульсаров в гамма-диапазоне, показал, что многие из выборки гамма-объектов,

Таблица 9 — Радиоспокойные пульсары, которые были отобраны для поиска периодического радиоизлучения на БСА ФИАН

Имя	α_{2000}	δ_{2000}	ссылка
J0357+3205	$03^h 57^m 52^s$	$32^\circ 05' 25''$	[26]
J0554+3107	$05^h 54^m 05^s$	$31^\circ 07' 41''$	[76]
J1958+2846	$19^h 58^m 40^s$	$28^\circ 45' 54''$	[26]
J2021+4026	$20^h 21^m 29^s$	$40^\circ 26' 45''$	[26]
J2055+2539	$20^h 55^m 48^s$	$25^\circ 40' 02''$	[77]

наблюдаемых в излучении в континууме, являются гамма-пульсарами [26]. До последнего времени попытки обнаружить радиоизлучение от пульсаров, найденных в наблюдениях Fermi, были безуспешными [73]. Пульсары, не имеющие радиоизлучения, назвали радиоспокойными. В 2018 году на конференции, которая проходила в Китае, представлялся доклад о результатах наблюдений одного из таких гамма-пульсаров [28]. Наблюдения проводились на 500-метровом телескопе FAST, находящемся в Китае.

Неудачные попытки обнаружения гамма-пульсаров на крупнейших в мире радиотелескопах говорят о необходимости достижения чрезвычайно высокой чувствительности для поиска периодического радиоизлучения от таких объектов. После того, как на антенне БСА прошла реконструкция, мониторинговые наблюдения проводятся ежедневно и накоплен достаточно большой объем данных, что может во много раз увеличить чувствительность при поиске пульсаров. В связи с этим мы предприняли попытку реализовать такую возможность для поиска периодического радиоизлучения от нескольких гамма-пульсаров [73], [74], [75]. Из каталога ATNF были отобраны все источники с гамма-излучением, попадающие в нашу мониторинговую площадку со склонениями $-9^\circ < \delta < +42^\circ$, у которых до сих пор не было обнаружено радиоизлучения (кроме J0357+3205) и период которых больше, чем 200 мс. Таких объектов оказалось 5, их имена, координаты и ссылки на работы, в которых они исследовались, приведены в Таблице 9.

Поиск радиоизлучения от пульсаров из Таблицы 9 проводился разными способами: поиск частотных гармоник, соответствующих периоду пульсара, в суммированных спектрах мощности, поиск гармоник в индивидуальных спектрах мощности, поиск отдельных сильных импульсов в направлении пульсаров.

Поиск гармоник в суммированном спектре мощности позволяет получить увеличение чувствительности в десятки раз [73]. Отсутствие гармоники, соответствующей периоду пульсара, дает верхнюю оценку плотности потока при предположении, что у пульсара в радиодиапазоне есть постоянное, пусть и очень слабое излучение.

Поиск пульсара в индивидуальных спектрах мощности рассчитан на обнаружение излучения в периоды возможного уярчения пульсара, связанные с возможной собственной переменностью, возможной вспышечной активностью, а также возможными мерцаниями пульсара на межзвездной среде.

Поиск пульсара по индивидуальным импульсам делался исходя из предположения, что у исследуемых пульсаров могут быть редкие гигантские импульсы.

Рассмотрим поиск радиоизлучения на примере гамма-пульсара J0357+3205 [73]. Его период составляет 0.444104 с, но даже несмотря на высокую чувствительность в поиске по суммарным спектрам мощности нам не удалось найти ярко выраженных гармоник, соответствующих этому периоду. Тем не менее существует вероятность обнаружения пульсара в индивидуальных записях несмотря на то, что он не виден в суммарных спектрах мощности, так как многие пульсары обладают как собственной переменностью, так и переменностью, вызванной межзвездной средой. Также у пульсаров могут наблюдаться периоды нуллингов или вспышечной активности. Поэтому в направлении пульсара J0357+3205 был проведен поиск сильных импульсов. Таких импульсов обнаружить не удалось. За пять лет наблюдений для этого пульсара было накоплено более 1700 сеансов наблюдений.

Ранее при поиске новых пульсаров мы принимали за критерий отношение сигнала к шуму больше, чем 6-7. Для пульсара J0357+3205 были просмотрены все 1700 индивидуальных спектров мощности, но гармоник с таким S/N не обнаружено. Однако в отличии от задачи слепого поиска у нас есть дополнительная информация о пульсаре. Это период пульсара, мера дисперсии, форма среднего профиля, полуширина импульса. Поэтому можно попытаться найти пульсар, даже если S/N в среднем профиле будет меньше, чем 6. Конечно, при понижении S/N нам будут попадаться случаи, когда из-за простого статистического распределения шумов окажется, что наблюдаемая гармоника случайно имеет большой S/N . В этом случае мы за критерий отбора брали повторяемость

по крайней мере в двух сессиях формы импульса, меры дисперсии и полуширины среднего профиля.

Для поиска пульсара были отобраны индивидуальные спектры мощности, высота гармоник которых имела отношение сигнала к шуму $S/N > 3$. Всего для дополнительного исследования удалось отобрать 36 дней. В программе BSA-Analytics (Qt/C++ под лицензией GPL V3.0), был использован режим «single_period». В этом режиме задается известный период и координаты пульсара и не делается перебора периодов и сдвигов по времени для выявления точного местоположения пульсара по прямому восхождению. Длина записи, в которой проводится поиск, составляет 180 с. При заданном параметре $P=0.4441$ с проводился перебор мер дисперсии от 0 до 200 $\text{пк}/\text{см}^3$. Считалось, что пульсар обнаружен, если при сложении исходного сигнала с двойным периодом на мерах дисперсии около $DM=47 \text{пк}/\text{см}^3$ (мера дисперсии пульсара J0357+3205, определенная по наблюдениям FAST [28]) появлялся второй пик на среднем профиле.

Из отобранных 36 дней для двух из них, 19.11.2015 и 23.12.2016, на графике S/N от DM были получены пики как раз в районе меры дисперсии 47 $\text{пк}/\text{см}^3$ (Рис. 1.20).

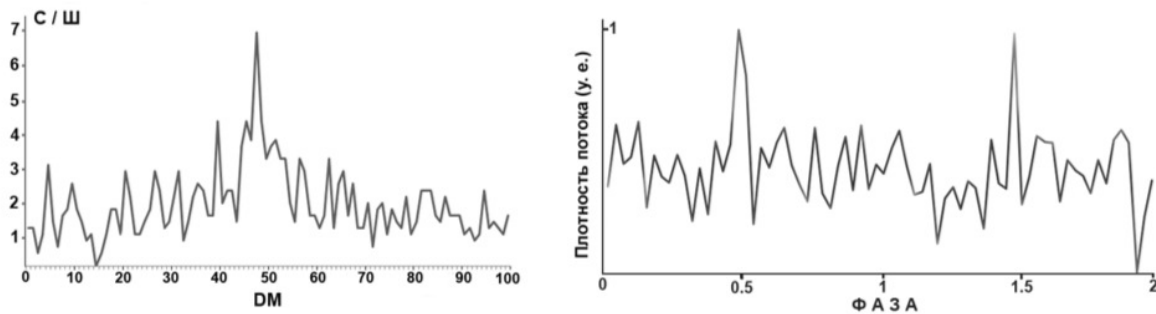


Рисунок 1.20 — Левая часть: средний профиль пульсара J0357+3205, вертикальная ось показывает отношение $S/\text{Ш}$, горизонтальная — меру дисперсии. Максимум попадает на $DM=46-48 \text{пк}/\text{см}^3$. Правая часть: средний профиль пульсара J0357+3205 с двойным периодом за 23.12.2016. По вертикальной оси отложены плотности потока в условных единицах, по горизонтальной — фаза, которая показывает распределение энергии в двойном профиле. Рисунок взят из [73].

В работе [26], посвященной исследованию гамма-пульсара J0357+3205, говорится, что в гамма-диапазоне в профиле пульсара видна одна компонента, занимающая четверть периода по половинной мощности, и полуширина профиля составляет порядка 100 мс. В работе [27] по исследованию пульсара в

рентгеновском диапазоне так же сказано о том, что видна одна компонента с такой же полушириной – примерно 100 мс. По исследованиям на FAST [28] в радиодиапазоне профиль этого пульсара является двухкомпонентным. Одна компонента широкая с полушириной около 90 мс., вторая заметно уже, от 25 до 30 мс, и по высоте соответствует более широкой компоненте, а расстояние между этими компонентами составляет около 165 мс. В наших наблюдениях мы видим только узкую компоненту, полуширина которой составляет 20-25 мс, что согласуется с результатами FAST на частоте 1250 МГц.

На Рис. 1.21 собраны средние профили гамма-пульсара J0357+3205, наблюдавшегося в разных диапазонах. Для того чтобы максимумы представленных средних профилей совпадали по высоте на рисунках, была проведена их нормировка.

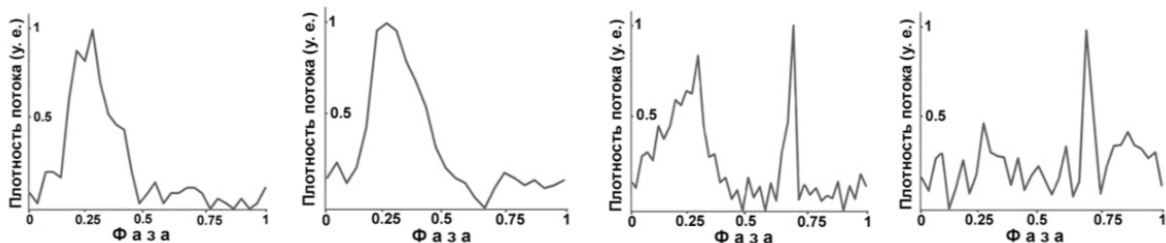


Рисунок 1.21 — Контуры средних профилей, взятые из работ, посвященных исследованиям гамма-пульсара J0357+3205 в разных диапазонах. Слева направо: в гамма-диапазоне [26], в рентгеновском [27] и радиодиапазоне на FAST с двумя компонентами [28]. Справа показан средний профиль, полученный нами на БСА ФИАН при усреднении с периодом $P=0.4441$ с. По вертикальной оси рисунков показана плотность потока в условных единицах, а по горизонтальной – фаза прихода импульса в долях периода. Рисунок взят из [73].

Мы можем точно рассчитать расположение исследуемых пульсаров по отношению к неподвижным лучам нашей антенны, так как мы знаем координату этих пульсаров с хорошей точностью. Следовательно, мы можем сделать поправки, которые позволят нам посчитать верхние оценки плотностей потока пульсаров, учитывая особенности антенной решетки БСА. Согласно теоретической оценке, лучшая чувствительность нашей антенны в направлении на зенит для пульсаров, находящихся вне галактической плоскости, составляет 5 мЯн [36]. Исходя из этого мы получили верхнюю оценку плотности потока гамма-пульсара J0357+3205: S_{111} МГц < 0.5 мЯн [75].

Таблица 10 — Верхние оценки интегральной плотности потока для выбранных гамма-пульсаров. Данные для таблицы взяты из [75].

Имя	P с	S_{int} (мЯн)
J0357+3205	0.44410	<0.5
J0554+3107	0.46496	<0.5
J1958+2846	0.29040	<0.5
J2021+4026	0.26532	<0.4
J2055+2539	0.31956	<0.55

То, что интегральная плотность потока для этого гамма-пульсара на 6-летнем интервале наблюдений оказалась меньше 0.5 мЯн, еще не значит, что в течение этих шести лет пульсар не проявлял никакой вспышечной активности.

Для остальных пульсаров, перечисленных в Таблице 9, был проведен такой же анализ, как для пульсара J0357+3205. Для всех этих пульсаров также не удалось обнаружить гармоник в усредненных спектрах мощности на известных периодах. Для них также были получены верхние оценки плотности потока.

Расстояния до исследуемых пульсаров косвенным образом были оценены разными авторами исходя из того, что это молодые пульсары, а значит они должны располагаться поблизости от остатков сверхновых, в результате вспышек которых они возникли. Все кандидаты оказались довольно близкими объектами. Расстояния до них следующие: J0357+3205 - 6 кпк [78], J0554+3107 - 3.5 кпк [76], J1958+2846 - 9.2 кпк [79], J2021+4026 - 2 кпк [80], J2055+2539 - 0.6 кпк [81]. Четыре пульсара, исключая J0357+3205, находятся в плоскости Галактики, их галактические широты меньше 10° , так что, вычисляя верхние оценки плотности потока для этих пульсаров, мы предполагали, что минимальная интегральная плотность потока в направлении на зенит в одной сессии наблюдений составляет не 5, а 10 мЯн [75].

Результаты оценки интегральных плотностей потока для всей выборки представлены в Таблице 10.

1.7 Выводы к Главе 1

1. Методом усреднения Фурье-спектров мощности проведен поиск пульсаров с периодами больше 0.4 с на склонениях $-9^\circ < \delta < +42^\circ$, результатом которого стало обнаружение 18-ти новых пульсаров с мера-

- ми дисперсии от 5 до 84 пк/см³. Применение новой системы калибровки 6-канальных данных на интервале 5 лет привело к обнаружению еще 5 новых пульсаров. Показано, что при поиске пульсаров методом суммирования спектров мощности на пятилетнем интервале наблюдений в зависимости от выбранного направления на небе отношение сигнала к шуму вырастает в 20-30 раз. В проведенном обзоре в данных с низким частотно-временным разрешением методом суммирования спектров мощности и периодограмм открыто 11 новых пульсаров. Для одного из них удалось получить средний профиль. В обзоре были зарегистрированы все известные пульсары с плотностью потока $S \geq 1$ мЯн, имеющие периоды > 0.5 с и меры дисперсии $DM \leq 55$ пк/см³.
2. Рассмотрена теоретическая оценка чувствительности радиотелескопа БСА ФИАН с учетом ширины частотного канала, эффекта рассеяния, используемого времени считывания и изменения чувствительности антенной решетки в разных направлениях и проведена проверка практической чувствительности обзора по известным пульсарам, попадающим в площадку наблюдений.
 3. Проведен поиск пульсаров в площадке $-9^\circ < \delta < +55^\circ$, которая еще не исследовалась, для $P > 0.025$ с и $DM < 1000$ пк/см³. В слепом поиске с использованием суммированных спектров мощности зарегистрировано 332 пульсара, 45 из которых оказались новыми пульсарами. Для 8 новых пульсаров получены средние профили. Для 7 ранее обнаруженных пульсаров уточнена мера дисперсии.
 4. Методом суммирования спектров мощности и периодограмм проведен поиск радиоизлучения в метровом диапазоне длин волн для пяти гамма-пульсаров. Периодическое излучение найдено для одного из них в одном сеансе наблюдений. Для пяти гамма-пульсаров получена верхняя оценка интегральной плотности потока.

Глава 2. Использование поисковых данных для извлечения дрейфовых периодов пульсаров.

2.1 Поиск дрейфовых периодов по суммарным спектрам мощности.

Отдельные импульсы пульсара состоят из одного или нескольких субимпульсов, появляющихся на определенных долготах в окне среднего профиля. Практически сразу после открытия пульсаров для некоторых из них было обнаружено изменение положения субимпульсов с течением времени внутри окна среднего профиля, то есть дрейф субимпульсов [82]. Дрейф проявляется в регулярном сдвиге фазы субимпульса при наблюдении последовательности импульсов. Субимпульсы образуют “полосы дрейфа”, горизонтальное расстояние между которыми соответствует периоду P_2 . Этот период может длиться от нескольких миллисекунд до сотен миллисекунд. Положение субимпульса в окне среднего профиля повторяется через промежуток времени, который выражается в периодах пульсара P_1 (в других главах обозначается как P). Этот интервал, который обычно не является целым числом, называется периодом P_3 . Очевидно, что для получения оценок периодов P_2 и P_3 необходимо регистрировать отдельные импульсы в течение длительного интервала времени, что является проблемой, поскольку наблюдаемая интенсивность отдельных субимпульсов обычно невелика. Субимпульсный дрейф наблюдается более чем у трети известных пульсаров [83, 84]). Наибольшее количество оценок P_2 и P_3 , основанных на наблюдениях отдельных импульсов, было выполнено в работе [83]. Из 187 пульсаров, наблюдаемых в Вестерборке на частоте 1400 МГц, 170 пульсаров имеют различные виды субимпульсной модуляции, а 68 пульсаров, то есть примерно треть из них, демонстрируют дрейфовое поведение.

В статье [83] в соответствии с характером дрейфа пульсары разделены на 3 класса: Coh , Dif и Dif^* в зависимости от ширины спектральных деталей в спектрах 2DFS (Two-Dimensional Fluctuation Spectrum). Если детализация в спектре узкая (менее 0,05 цикла за период), то дрейф является когерентным (Coh). Пульсары, показывающие широкие размытые детали, делятся на Dif^* (детали близки к началу или концу спектра) и Dif (рассеянные детали находятся далеко от краев спектра).

Предположительно дрейф субимпульсов пульсаров является внутренней особенностью механизма их излучения, поэтому его изучение является важ-

ной физической задачей. На оценку периодов P2 и P3 могут влиять различные факторы. Одним из них являются нуллины, то есть пропуск последовательных импульсов. В этом случае механизм излучения “выключается”, и скорость дрейфа может уменьшаться, а затем в некоторых случаях возвращаться к прежнему значению [85]. Другим эффектом, наблюдаемым для ряда пульсаров, является изменение режима (формы) интегрального профиля. При переключении режимов скорость дрейфа может изменяться [86, 87]. На сегодняшний день известно несколько моделей, объясняющих дрейф импульсов пульсаров. Наиболее широко используемой из них является модель искрового промежутка [88], развитая в работах многих авторов [89, 90]. Согласно этой модели, дрейфовое поведение может быть объяснено наличием вращающихся разрядов, которые циркулируют вокруг магнитной оси под действием $E \times B$ дрейфа. $E \times B$ дрейф является одним из фундаментальных дрейфов, которые возникают в однородных и перпендикулярных друг другу магнитном и электрическом полях. В такой модели время прихода импульсов должно смещаться в окне среднего профиля. В ряде работ периодичность модуляции амплитуды субимпульсов интерпретировалась как вызванная регулярным вращением плазменных “субпучков” вокруг магнитной оси (карусельная модель), и было определено время такой циркуляции для нескольких пульсаров [91, 92].

Как правило, для измерения периодов дрейфа P2 и P3 используются спектры временных изменений амплитуды субимпульсов на разных долготах среднего профиля. Очевидно, что получение оценок P2 и P3 является технически сложной задачей, поскольку для этого требуются наблюдения отдельных импульсов с хорошим отношением сигнал/шум и, следовательно, необходима высокая флуктуационная чувствительность радиотелескопа. Анализ интегральных двумерных (по времени и долготе) спектров флуктуаций 2DFS позволил изучить дрейфовое поведение большого числа пульсаров [83, 93, 94].

В работе [95] был использован другой метод оценки P2 и P3. Оказалось, что в спектрах мощности, просуммированных за много дней, могут быть характерные особенности, наблюдаемая частота которых связана с периодами субимпульсного дрейфа P2 и P3. Амплитуда последовательных гармоник, первая из которых определяется периодом пульсара P1, может иногда уменьшаться до уровня шума, затем она начинает расти и снова уменьшаться. Часто таких «горбов» бывает несколько. В работе [95] такая модуляция была связана с периодом дрейфа P2. Вторая особенность в спектрах мощности - это гармоники-

сателлиты, когда рядом с основными гармониками появляется дополнительная гармоника. Расстояние между вспомогательной гармоникой и основной гармоникой было связано с периодом дрейфа P3. С использованием суммарных спектров мощности 27 сильнейших пульсаров в работе [95] были получены оценки P2 для 26 пульсаров и P3 для 13 пульсаров.

В представляемой работе [96] поиск периодов дрейфа P2 и P3 проводится по суммарным спектрам мощности для 41 пульсара в площадке со склонениями от -9° до $+42^\circ$. Суммирование спектров мощности позволяет значительно увеличить отношение сигнал/шум и выявить слабые детали в спектре мощности слабых пульсаров. Нам удалось показать, что анализ суммарного спектра мощности позволяет определить наиболее часто встречающиеся параметры дрейфа, включая направление дрейфа, наиболее характерное для пульсара. Известно, что для ряда пульсаров параметры направления дрейфа субимпульсов могут изменяться с течением времени [83, 94], что значительно усложняет общую картину. Наш метод позволяет, в отличие от других методов, определить средние параметры дрейфа пульсара за длительный промежуток времени. Поскольку мониторинг на антенне БСА ФИАН ведется ежедневно и круглосуточно, нам удалось накопить данные общей длительностью примерно пять дней для каждой точки неба на интервале 5,5 лет (2057 спектров мощности). Было проведено моделирование дрейфа импульсов для выбранных пульсаров и расчет спектров мощности для них с учетом временного интервала, используемого в течение одного сеанса, периода пульсара, ширины субимпульсов и модуляции плотности потока от импульса к импульсу. Смоделированные спектры мощности сравнивались со спектрами мощности, полученными в результате суммирования спектров мощности за многие сеансы наблюдений, и были определены значения P2 и P3. Мы также пересмотрели ранние оценки P2 и P3 из работы [95].

В спектре мощности первый «горб», связанный с модуляцией основных гармоник спектра мощности и, возможно, вызванный дрейфом, может приходиться на конец спектра мощности. Положение главной гармоники в спектре мощности определяется как $T/P1$, где T, временной интервал каждой отдельной записи в наших наблюдениях, составляет $T = 204,682$ секунды. Для пульсара с периодом $P1 = 100$ мс это соответствует на спектре точке 2047. В общей сложности мы имеем 8192 точки в спектре мощности. Следовательно, вторая гармоника попадет на точку 4094 в спектре, и только 4 гармоники будут включены в полный спектр мощности. Для уверенного определения P2 необходимо

иметь более 5 гармоник, чтобы увидеть модуляцию. Для пульсаров с периодом менее 100 мс поиск P2 в данных мониторинга будет невозможен. Критерием выбора пульсаров для поиска дрейфа являлся период $P1 > 200$ мс, чтобы в спектре мощности можно наблюдать более 8 гармоник для возможного обнаружения гармонической модуляции. В этом случае мы можем увидеть по крайней мере два «горба». Таким образом для работы был выбран 41 пульсар с отношением $S/N > 10$ (список пульсаров приведен в Приложении 4).

Для получения оценок периодов дрейфа пульсаров мы использовали суммарные спектры мощности после устранения дисперсии и выравнивания коэффициента усиления в частотных каналах. Перед вычислением спектров мощности данные были очищены от помех и оценен уровень шума. Сигнал калибровки с известной температурой регистрируется каждые четыре часа. Это позволяет выполнять калибровку данных за разные дни в одних и тех же единицах измерения. Среднее значение сигмы шума с использованием откалиброванного сигнала оценивалось для каждого источника независимо, и, если в этой записи значение превышало заданный уровень шума для данного направления (подробности можно посмотреть в нашей работе [39]), то она не использовалась для дальнейшей обработки. Для каждой выбранной записи был рассчитан спектр мощности методом быстрого преобразования Фурье (FFT). Затем спектры мощности были суммированы для всех сеансов наблюдений. В результате мы получили $N/2$ точек спектра мощности с разрешением $\Delta f = 0,004886$ Гц. Общее количество суммированных спектров мощности варьировалось от 700 до 2000.

Для анализа суммарных спектров мощности пульсаров мы использовали следующую модель. На временном интервале T была сформирована последовательность импульсов с периодом пульсара $P1$. Предполагалось, что импульсы имеют форму гауссианы, в качестве параметров были заданы их амплитуда и полуширина на уровне $1/2$ амплитуды ($W_{0.5}$). Все изученные нами пульсары имеют небольшие показатели дисперсии, менее 51 пк/см³, поэтому уширение импульса из-за рассеяния в межзвездной плазме на частоте 111 МГц меньше нашего временного разрешения ($12,5$ мс) и, следовательно, не влияет на форму импульса. Распределение амплитуды импульсов также было важным параметром. Мы рассмотрели 2 варианта: 1) постоянная амплитуда импульса со значением A и 2) случайно распределенные амплитуды импульсов, a_i , согласно уравнению: $a_i = (\text{rand}-0.5)*2A*0.01*\text{smod}+A$, где smod - процент модуляции

(от 0 до 100%) и rand - случайное число от 0 до 1. Здесь мы использовали генератор случайных чисел. Среднее значение A , используемое для моделирования, равно 10 (в произвольных единицах измерения). P_2 может быть как положительным, так и отрицательным. Отрицательное значение P_2 означает, что субимпульсы появляются раньше в последовательных импульсах, то есть субимпульсы смещены влево, отрицательный дрейф, а если вправо, то значение P_2 положительное, это положительный дрейф. Таким образом, знаки P_2 соответствуют направлению дрейфа. В каждом периоде, имеющем равную полуширину и амплитуду, задавали один или два субимпульса с интервалом между ними, равным P_2 мс. Фазовый сдвиг импульсов в течение одного периода пульсара определялся соотношением P_2/P_3 , то есть после каждых P_3 периодов пульсара фаза следующего импульса возвращается в исходное положение, как было до сдвига. Направление дрейфа в моделировании было одним из параметров. При наличии одного субимпульса рассматривались 2 варианта: 1) при отсутствии дрейфа предполагалось, что P_2 равен нулю, и он не смещается во времени; 2) субимпульс смещается со скоростью P_2/P_3 . На основе полученной последовательности импульсов с дрейфом или без него был рассчитан спектр мощности с использованием FFT и проведено сравнение с полученным суммарным спектром мощности. В спектре мощности P_2 будет проявляться как периодическая модуляция основных гармоник спектра мощности с периодом $k_{P_2} = T/P_2$. P_3 будет отображаться в виде дополнительных гармонических сателлитов с интервалом в $\tau = T/(P_3 \cdot P_1)$ от основных гармоник (τ - интервал, выраженный в точках, а k_{P_2} - количество точек в спектре мощности первого «горба» модуляции).

Поскольку у нас конечная длина записи данных T и, в большинстве случаев, отношение T/P_1 не является целым числом, происходит дополнительная модуляция амплитуд гармоник спектра мощности. Амплитуда гармоники увеличивается по мере приближения значения $k(T/P_1)$ к целому числу (k - номер гармоники). Поясним это на примере. Если бы T/P_1 было целым числом, то амплитуда гармоник в спектре мощности уменьшалась бы в соответствии с гауссовой огибающей, полуширина которой пропорциональна обратной ширине начальных импульсов. На Рис.2.1 показан пример такого модельного спектра мощности для последовательности импульсов с периодом $P_1 = 2.0468$ с, временным промежутком кратно T и полушириной импульсов $W_{0,5} = 12.5$ мс. Для номера точки в спектре мощности $n \geq 6000$ амплитуда гармоник уменьшается

более чем в 250 раз, и модуляцию, связанную с дрейфом, можно обнаружить только для очень сильных пульсаров.

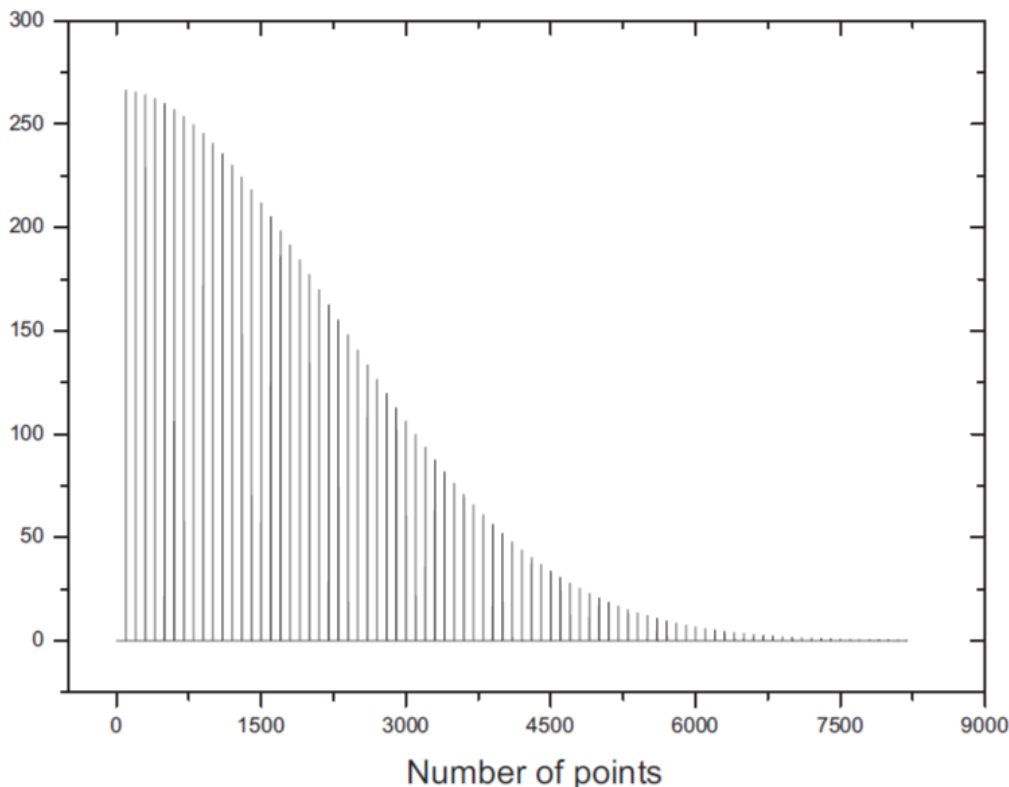


Рисунок 2.1 — Спектр мощности для модельного массива с $P1 = 2,04682$ с, $W_{0,5} = 12.5$ мс. По горизонтальной оси отложено количество точек в спектре мощности ($\Delta f = 0,004886$ Гц), вертикальная ось показывает амплитуду гармоник в произвольных единицах измерения. Рисунок взят из [96].

На Рис.2.2б показан пример модельного спектра мощности последовательности импульсов с периодом $P1 = 2.0915$ с без дрейфа (период соответствует пульсару J0928+3037) и $W_{0,5} = 12.5$ мс. В данном случае $T/P1 = 97.845$ и 6-я, 7-я и 8-я гармоники, а также кратные им, имеют значения положения гармоник, наиболее близких к целому числу $k(T/P1)$: 587.07, 684.92, 782.76, что приводит к их локальным максимумам.

Соответственно, возникает периодическая модуляция амплитуд гармоник, которая не связана с дрейфом импульсов. Рис.2.2а показывает суммарный спектр мощности, полученный в результате наблюдений, на котором видна та же гармоническая модуляция. Отсутствие тринадцатой гармоники вызвано помехами, из-за которых она была удалена. Для модельных импульсов в основном используется полуширина $W_{0,5} = 12.5$ мс, которая адекватно характеризует реальную ширину отдельных импульсов (общая ширина 25 мс на уровне 1/2 от

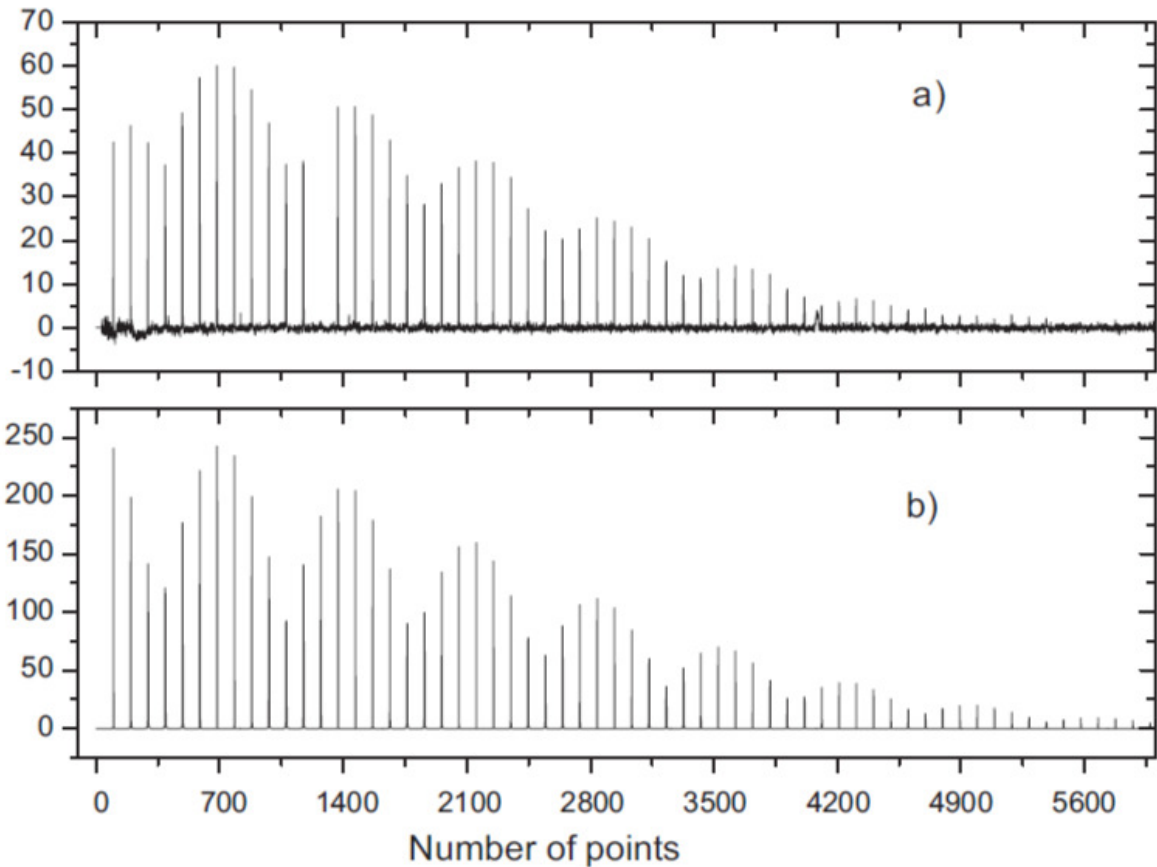


Рисунок 2.2 — а) Полученный суммарный спектр мощности, б) модель спектра мощности для пульсара J0928+3037. Период $P_1 = 2,0915$ с, $W_{0,5} = 12.5$ мс, $P_2 = 0$ мс. Обозначение осей такое же, как на Рис.2.1. Рисунок взят из [96].

максимальной) при нашем времени опроса 12,5 мс. Ширина импульса не влияет на результаты моделирования. Однако следует отметить, что амплитуда гармоник будет изменяться в зависимости от ширины, что должно оказывать некоторое влияние на характеристики спектра мощности. Амплитуда гармоник будет равна $\sim W_{0,5}^2$, а полуширина гармонического распределения в спектре мощности будет пропорциональна $1/W_{0,5}$. Это было проверено путем моделирования импульсов с разными $W_{0,5}$. Даже если ширина показывает различия между различными данными и пульсарами, суммарный спектр мощности отражает среднюю ширину импульсов на всем интервале наблюдений.

Моделирование показало, что случайные изменения амплитуд начальных импульсов практически не влияют на распределение амплитуд гармоник спектра мощности (см. Рис.2.3). Из рисунка видно, что модельные массивы достаточно хорошо описывают наблюдения.

На Рис.2.4а показан пример спектра накопленной мощности за 600 сеансов для пульсара J0528+2200 (B0525+21). В результирующем спектре мощности

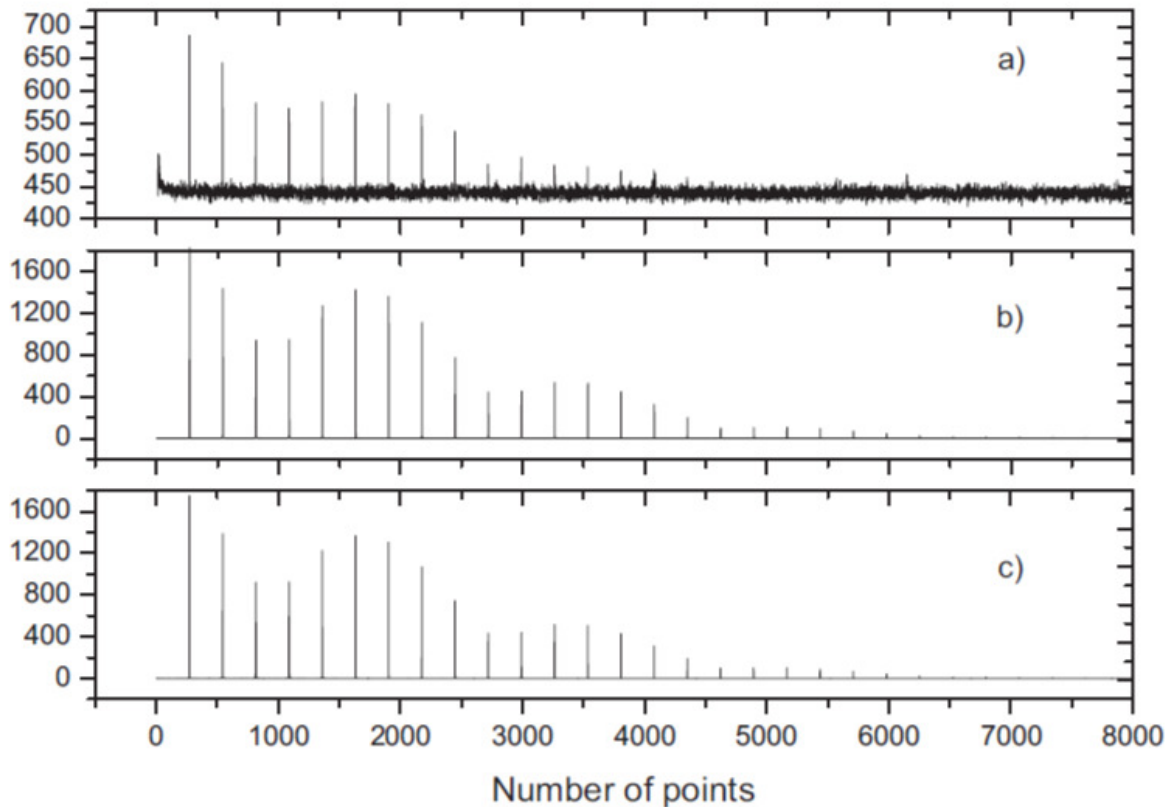


Рисунок 2.3 — Спектр мощности для пульсара J1823+0550 ($P_1 = 0,75291$ с): а) результирующий суммарный спектр мощности; б) модель без амплитудно-импульсной модуляции; в) модель с 50%-ной амплитудно-импульсной модуляцией, $P_2 = 0$. Обозначение осей такое же, как на Рис.2.1. Рисунок взят из [96].

не видны дополнительные гармонические спутники. Основные гармоники не имеют смещений по сравнению с их ожидаемым положением, и, следовательно, отсутствует дрейф. Отчетливо видна модуляция основных гармоник спектра мощности с четко выраженными двумя максимумами.

Пульсар B0525+21 имеет долю нуллингов в 25% [97]. Наша модель может объяснить этот эффект. Моделирование импульсов с различной длительностью нуллингов (до 50%) и параметрами дрейфа показало, что амплитудное распределение гармоник и положение спутников в спектре мощности не меняются, но амплитуда всех гармоник уменьшается в зависимости от длительности периода нуллингов. Сеансы с небольшой долей нуллингов будут иметь наибольший вклад в спектр мощности, накапливаемый в течение многих сеансов. Пример спектров для моделирования импульсов с длительностью нуллингов 45% и без нее можно увидеть на Рис.2.5.

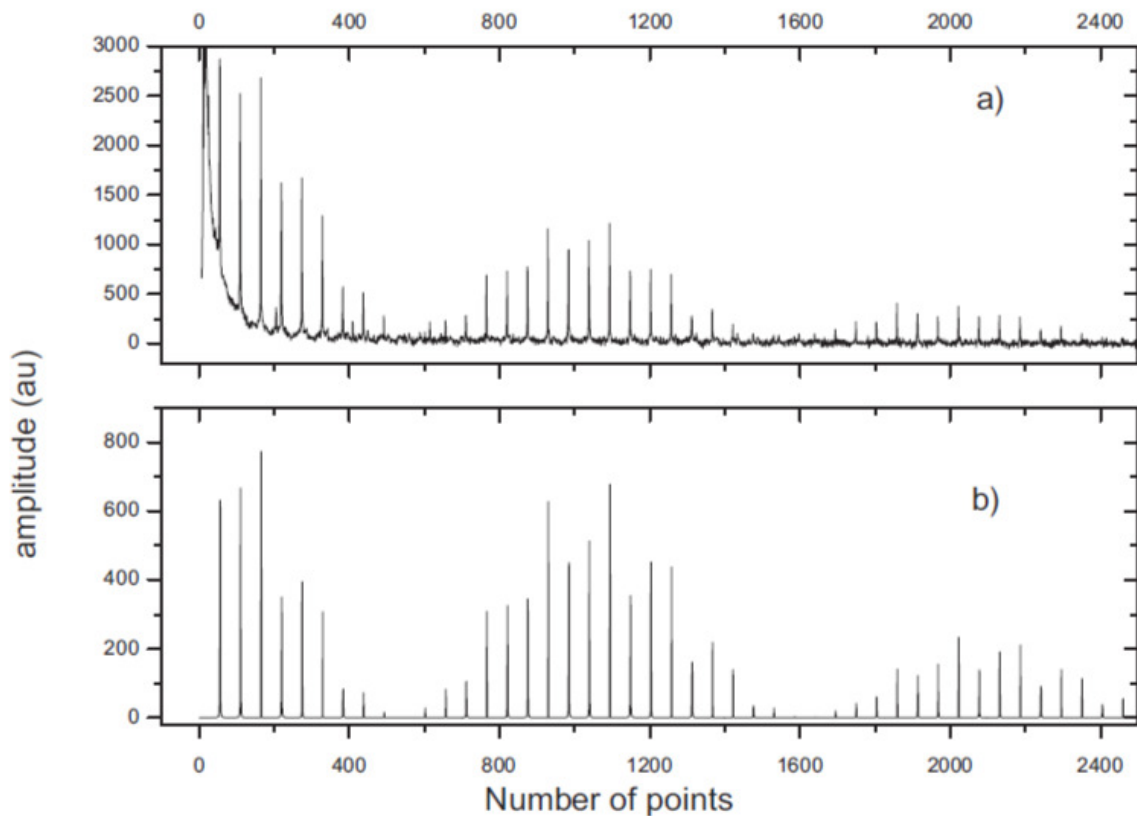


Рисунок 2.4 — а) спектр мощности для пульсара J0528+2200 после подведения итогов 600 сеансов; б) модельный спектр мощности без дрейфа, соответствующий следующим параметрам пульсара: $P_2 = 190$ мс, $W_{0,5} = 22$ мс. Обозначение осей такое же, как на Рис.2.1. Рисунок взят из [96].

В суммарном спектре мощности пульсара J0034-0721 (B0031-07) на Рис.2.6 отчетливо видна модуляция как основных гармоник (внизу), так и вспомогательных гармоник (вверху). Период P_3 определяется расстоянием r от основной гармоники: $P_3 = T/(rP_1)$. На полученном спектре мощности в диапазоне номеров точек до 2700 дополнительные гармоники не видны. Амплитуда основных гармоник становится заметной, и в то же время справа при $n > 2700$ появляются дополнительные гармоники, амплитуда которых примерно в 2 раза превышает основные гармоники. Центр огибающей модуляции приходится на $n = 3255$, что соответствует $P_2 = -63$ мс. Вспомогательные гармоники расположены справа от основной гармоники на расстоянии $r = 16$ точек, что соответствует значению $P_3 = 13.6P_1$, и смещение происходит в сторону начала импульса, т.е. P_2 является отрицательным. Анализ суммарных спектров мощности, показанных на Рис.2.6, дает значение $P_3 = (13.6 \pm 0.4)P_1$, соответствующее режиму дрейфа А. Немного позже рассмотрим различные режимы дрейфа для этого пульсара.

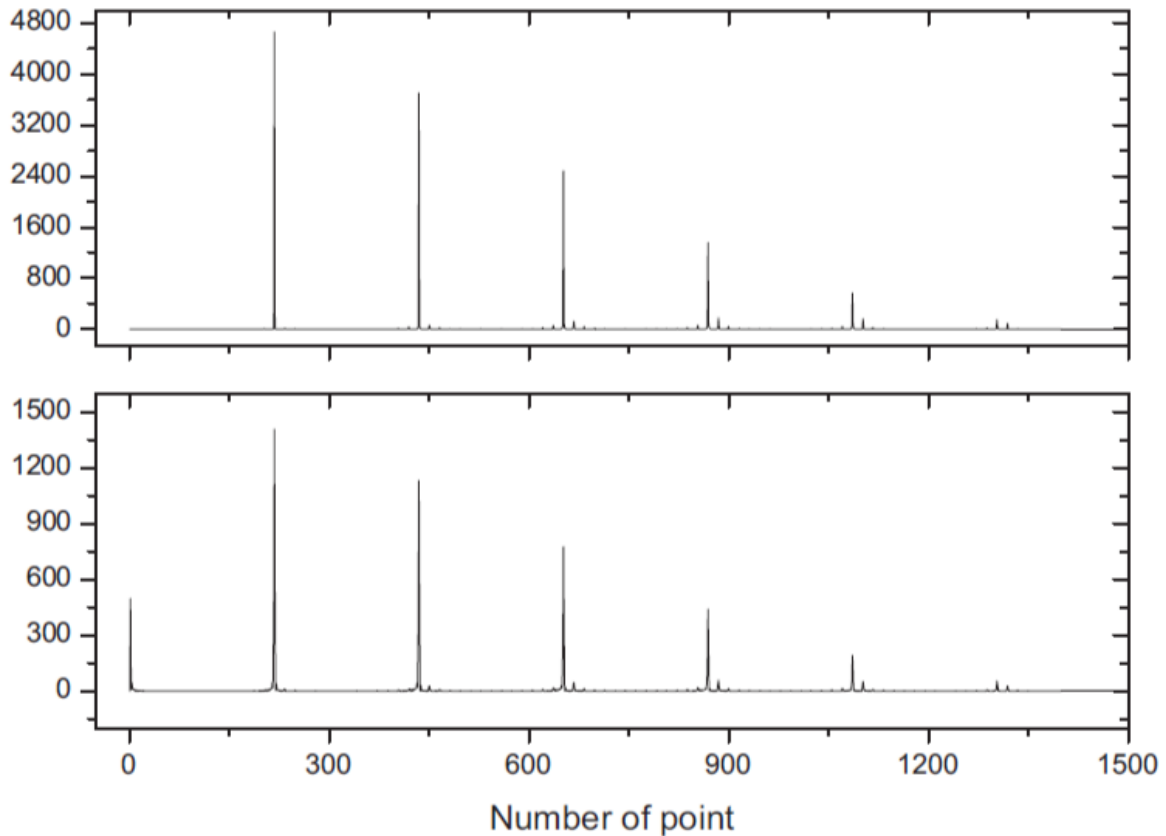


Рисунок 2.5 — Смоделированный спектр мощности с параметрами для пульсара J0034-0721. Вверху представлена часть этого спектра мощности без нуллингов. Внизу - то же самое для моделирования импульсов с длительностью нуллингов 45%. Обозначение осей такое же, как на Рис.2.1.

Рисунок взят из [96].

Моделирование показывает, что всегда, когда направление дрейфа импульсов идет к началу профиля (P2 отрицательное), вспомогательная гармоника с более высокими амплитудами появляется справа от основной гармоники, а когда дрейф направлен к концу профиля (P2 положительное) - слева. На Рис. 2.7 показано такое поведение сателлитных гармоник: модели с параметрами для пульсара J0034-0721 для случая со смещением к началу профиля (P2 = -63 мс (Рис.31b)) и к концу профиля (P2 = +63 мс, Рис.31с), P3 = 13.6P1.

Панель а на Рис.2.7 соответствует суммарному спектру мощности. На Рис.2.7b,c показаны первые гармоники спектра мощности, увеличенные в масштабе в 4 раза, с тем же масштабом для горизонтальной оси. Смещенные гармоники, связанные с периодом дрейфа P3, имеют значительно меньшую амплитуду по сравнению с основными гармониками в начале спектра мощности. При P2 = -63 мс вспомогательная гармоника расположена справа от основной

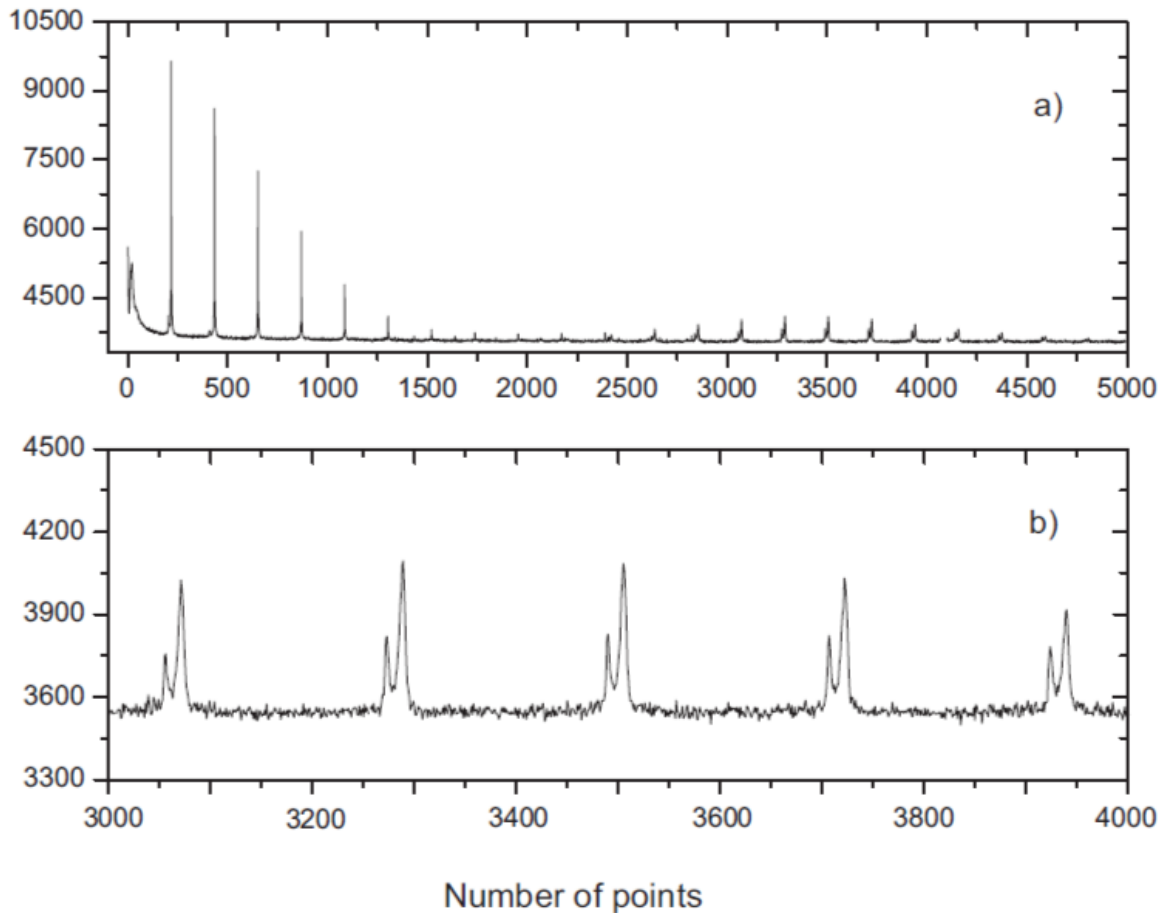


Рисунок 2.6 — Полученный спектр мощности пульсара J0034-0721: $P1 = 0.943$ с, $P2 = -63$ мс, $P3 = 13.6P1$. Вверху показана часть этого спектра мощности с сопутствующими гармониками справа от основных гармоник. Основные гармоники меньше модуляционных примерно в два раза. Обозначение осей такое же, как на Рис. 2.1. Рисунок взят из [96].

гармоники на расстоянии 16 точек, а при $P2 = 63$ мс она находится слева на том же расстоянии, как и должно быть, когда дрейф происходит в разных направлениях. На Рис.2.7а спектр мощности показан в более широком диапазоне. Для этого спектра мощности в “горбе” модуляции видны только гармоники со смещением на $\tau = 16$ точек, амплитуда которых превышает основные гармоники в 10 и более раз.

Следовательно, наиболее точным определением $P3$ является определение положения сдвинутых гармоник вправо или влево от основных, связанных с периодом $P1$. Позиция τ определяется с точностью до дискретной ячейки (с точностью до одной точки), поэтому мы будем считать, что она не хуже $\pm 1/2$ от дискретной ячейки. Частотная длительность дискрета (размер бина) каждой нашей дискретной ячейки составляет 0,004886 Гц ($1/T$). Точность определения

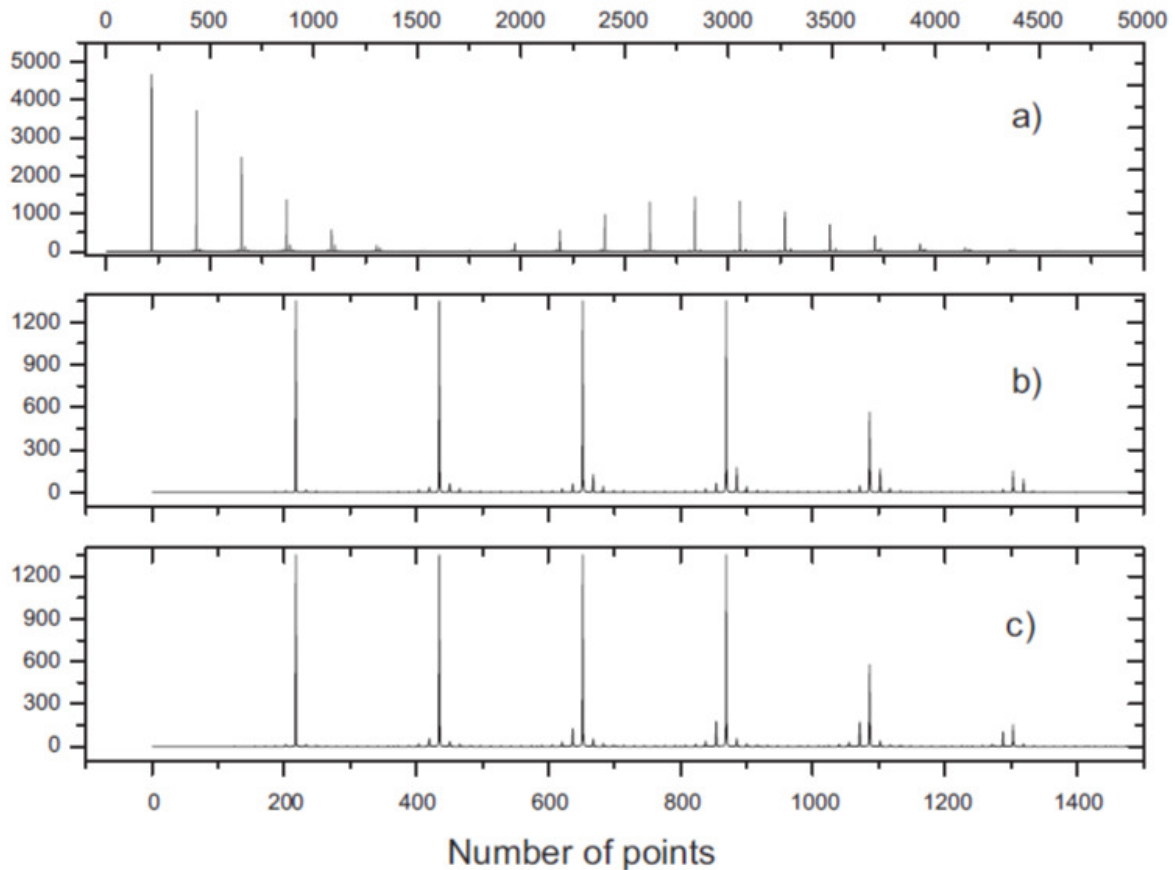


Рисунок 2.7 — Модельные спектры мощности дрейфа импульсов с параметрами пульсара J0034-0721: $P_1 = 0.943$ с, $W_{0,5} = 12.5$ мс, $P_3 = 13.6P_1$: а) модельный спектр мощности в широком диапазоне гармоник с $P_2 = -63$ мс; б) и в) первые гармоники спектра мощности, увеличенные по масштабу в 4 раза и с разными направлением дрейфа: б) $P_2 = -63$ мс, в) $P_2 = +63$ мс.

Рисунок взят из [96].

P_2 связана с точностью нахождения центров “горбов” модуляции спектров мощности. Мы предполагаем, что погрешность в P_2 определяется с точностью \pm одна гармоника от центрального положения огибающей модуляции. Полученные параметры для P_2 и P_3 с их погрешностями приведены в Таблице 11.

В работе [95], где была предложена и протестирована новая методика, было обнаружено, что почти все изученные пульсары имеют модуляцию амплитуд основных гармоник в спектрах мощности. Это было интерпретировано как наличие дрейфующих субимпульсов и использовано для определения значения P_2 . Обнаружение спутников гармонических пиков в спектрах мощности позволило измерить период P_3 . Авторы [95] отмечают, что все новые оценки, как P_2 , так и P_3 , нуждаются в подтверждении. Наше моделирование импуль-

Таблица 11 — Пульсары с оценками периодов дрейфа P2 и P3. Таблица взята из [96].

Имя	P1 с	P2 (БСА) мс	P2 (W06) мс	P3 (БСА)	P3 (W06)
J0034-0721 (Dif)	0.9429	-63±5	-105 ₋₁₃₁ ⁺⁵	13.6±0.4	8.3±0.3
J0034+1932 (Dif*)	1.3875	69.4 ₋₆ ⁺⁵	-135 ₋₂₁ ⁺²⁷		5.2±0.3
J0323+3944* (Coh)	3.0321	+118±10	152 ₋₂₈ ⁺⁴²	8.44±0.05 (M18)	8.4±0.1
J0528+2200* (Dif*)	3.7455	-190±16	-200 ₋₉₀ ⁺²⁰	4.9±0.5 (M18)	3.8±0.7
J0611+3016*	1.4121			3.6±0.5	
J0826+2637* (Dif*)	0.5307		80 ₋₁₀ ⁺⁶⁰	5.2±0.2	7±2
J1136+1551* (Dif*)	1.1879	36±3	430 ₋₅₀ ⁺⁴⁰⁰		3±1
J1239+2452* (Dif*)	1.3824	62±5	61 ₋₉ ⁺⁴	2.74±0.03	2.7±1
J1532+2745	1.1248	39±3			
J1721+3524	0.8219	117 ₋₁₁ ⁺⁸			
J1921+2153* (Dif)	1.3373	< -40	-13±1	4.1±0.06	4.4±0.1
J2046+1540 (Dif*)	1.1383	52±8	-22 _{-4.4} ^{+1.6}		18±6
J2227+3030	0.8424	105±10			
J2234+2114	1.3574			23.3±2	

сов с известным периодом пульсара и временным интервалом показало, что определенные периоды P2 в [95] из-за модуляции спектра мощности гармоники не связаны с дрейфом для 18 пульсаров. Амплитудное распределение гармоник для них объясняется соответствующим значением $n = kT/P1$. Список этих пульсаров следующий: J0613+3721, J0826+2637, J0928+30, J1136+1551, J1635+2418, J1741+2758, J1758+3030, J1813+4013, J1907+4002, J1912+2525, J2018+2839, J2055+2209, J2113+2754, J2139+2242, J2208+4056, J2234+2114, J2305+3100, J2317+2149. В статье [95] знак периода дрейфа P2 не был определен, и в этой работе мы приводим его для пульсаров, у которых измерены значения P3.

Наличие модуляции в спектре мощности указывает либо на дрейф, либо на наличие субимпульсов с расстоянием между ними, которое соответствует положению максимума этой модуляции. Могут быть случаи, когда дрейф может присутствовать, но он нерегулярен или очень медленный с $P3 \gtrsim T/(2*P1)$, и мы не можем видеть смещенные гармоники относительно основных ($r \lesssim 2$). Стоит обратить внимание на то, что для пульсара J1921+2153 мы получили только верхнюю оценку P2, но мы не можем исключить значения $P2 \lesssim 40$ мс, потому что в этом случае $kP2 \gtrsim 5000$ и амплитуда будет мала. Мы получили значение $P3 = 4.1P1$, которое корректирует значения вспомогательной гармоники, смещенной вправо от основных гармоник.

Пульсар J0826+2637 имеет сателлиты небольшой равной амплитуды по обе стороны от основных гармоник, и мы определили P3, указанный в Таблице 11. Отсутствует модуляция, соответствующая периоду P2 для этого пульсара. В работе [98] автор обнаружил, что этот пульсар демонстрирует дрейф в виде всплесков, но направление дрейфа отличается для разных всплесков. Полученное нами значение P3 хорошо согласуется со значением в работе [83]. Постимпульс и интерпульс, известные для этого пульсара, имеют небольшие амплитуды, в 30 и 65 раз меньше амплитуды основного импульса на частоте 111 МГц [99]. Кроме того, постимпульс плохо отделяется от основного импульса с нашим временным разрешением 12.5 мс. Следовательно, эти компоненты профиля не влияют на общий спектр мощности.

Спектр мощности пульсара J2234+2114 показывает сателлиты по обе стороны от основных гармоник примерно одинаковой амплитуды, как и у J0826+2637. Это можно объяснить дрейфом в разных направлениях. Значение P2, полученное для пульсара J1136+1551, соответствует расстоянию между компонентами среднего профиля, а период, полученный в работах [83] и [95], нами не подтвержден.

В Таблице 11 приведены оценки периодов дрейфа, которые мы определили. Если пульсар попадает в классификацию [83], это указывается рядом с обозначением пульсара в квадратных скобках. В первом столбце таблицы приведены названия пульсаров. Звездочки рядом с названиями указывают на пульсары, рассмотренные в работе [95], для них ранее полученные значения приведены в скобках с обозначением M18 в соответствующих столбцах. Во втором столбце указан период. В третьем и четвертом столбцах приведены оценки периода дрейфа P2, полученные нами и в работе [83] соответственно. В пятом и шестом столбцах указан период P3, определенный нами и в работе [83]. Если в [83] определены несколько периодов P2 и P3, то они также отображаются в таблице.

Как видно из Таблицы 11, для тех источников, у которых в спектре мощности отсутствуют гармонические спутники, мы указываем только значение P2 без знака, в то время как для пульсаров с положительным значением P2 мы ставим знак “+” (для случая, когда мы получили значение для P3). Для пульсаров J0304+1932, J1136+1551 и J2046+1540 в работе [83] был определен период P3, в то время как по наблюдениям на БСА ФИАН его определить было нельзя. Эти три пульсара принадлежат к классу “Dif*” и, следовательно, имеют неста-

бильный дрейф и широкую детализацию в спектре 2DFS. Для J1136+1551 и J0528+2250 измеренные значения P_2 соответствуют расстоянию между компонентами на нашей частоте, как указано выше.

Только один пульсар J0323+3944 из таблицы 11 относится к классу “Coh”, и для него параметры дрейфа в пределах погрешности согласуются с данными, приведенными в работе [83]. На Рис.2.8 показана часть суммарного спектра мощности для пульсара J0323+3944. В этом спектре мощности ясно видно, что хотя амплитуда основных гармоник падает, амплитуда сдвинутых влево гармоник, связанных с P_3 , не уменьшается, и они становятся преобладающими. Для 11 пульсаров (J0034-0721, J0304+1932, J0323+3944, J0528+2200, J1136+1551, J1239+2452, J1532+2745, J1722+35, J1921+2153, J2046+1540, J2227+3030) мы определили или переопределили период дрейфа P_2 . Для 7 пульсаров (J0034-0721, J0323+3944, J0611+3016, J0826+2637, J1239+2452, J1921+2153, J2234+2114) были определены направление дрейфа и значение P_3 .

Для 9 пульсаров из Таблицы 11 оценки P_2 были получены ранее в работе [83], и только для четырех из них (J0323+3944, J0528+2200, J1239+2452 и J1921+2153) наши оценки совпадают в пределах погрешности. Для пульсара J1921+2153 наш верхний предел для P_2 не противоречит значению из [83]. J0034-0721 и J0304+1932 имеют большие ошибки для P_2 в [83], поэтому трудно сравнивать их значения. В работе [83] семь из этих девяти пульсаров были идентифицированы как “Dif” или “Dif*”, то есть не имеющие когерентного дрейфа. Для пульсара J0611+3016 наблюдается необычный спектр мощности. На Рис.2.8 видно, что гармоники, обусловленные периодическим излучением пульсара, имеют низкоуровневую детализацию, смещенную влево от основной гармоники. Сдвиг был определен как отличие от ее максимума. По его смещению был определен период P_3 , указанный в Таблице 11. Период P_2 определить не удалось, поскольку в спектре мощности отсутствует выраженная модуляция. По-видимому, наблюдается неравномерный дрейф субимпульсов к концу профиля.

Мы использовали простейшие предположения о субимпульсном дрейфе для определения по моделируемым спектрам мощности. В действительности поведение дрейфа может быть значительно сложнее. Известно, что дрейф может быть нелинейным: два субимпульса могут иметь разные скорости и направление, скачки в фазе субимпульсов ([94]), также скорость и направление дрейфа могут меняться со временем.

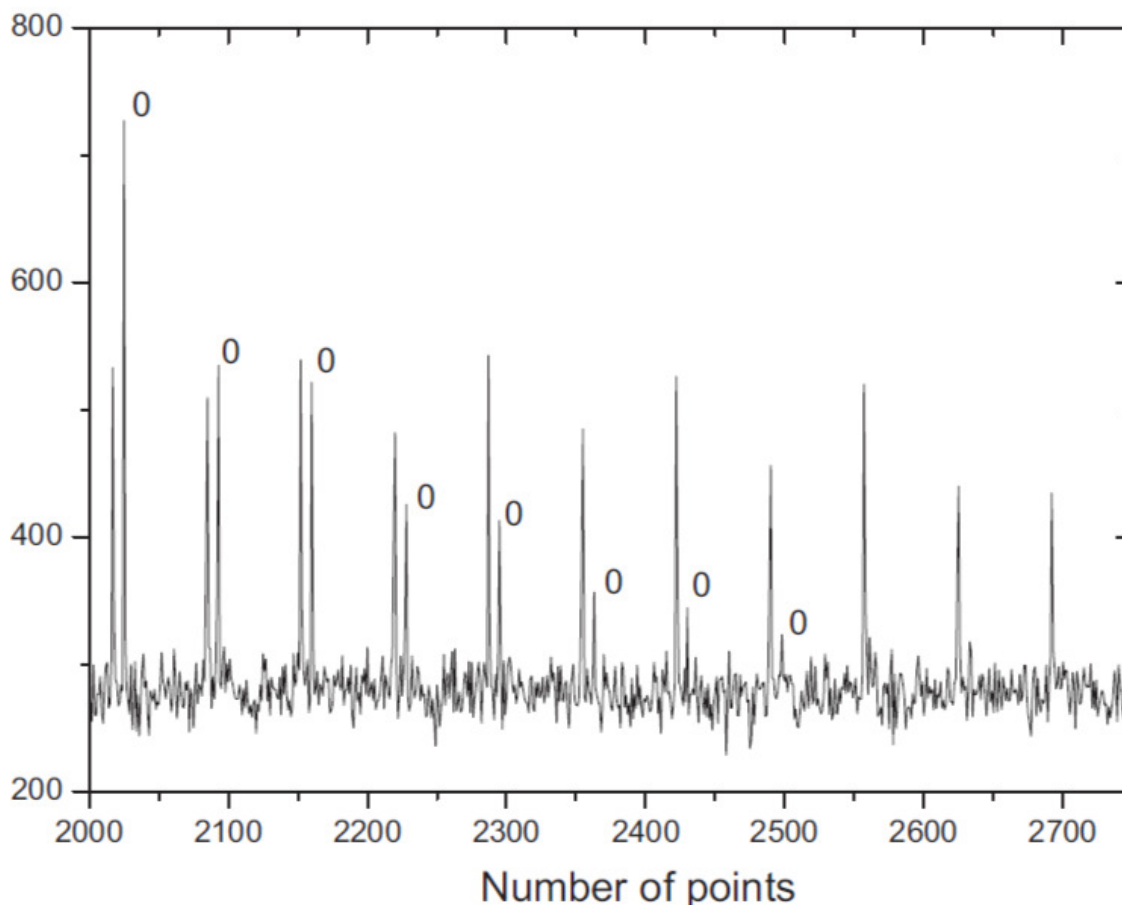


Рисунок 2.8 — Часть спектра накопленной мощности пульсара J0323+3944.

Символ “O” обозначает основную гармонику, перед ней - гармоника, смещенная влево из-за смещения дрейфа к концу профиля. Обозначение осей такое же, как на Рис.2.1. Рисунок взят из [96].

2.2 Выводы к Главе 2

1. С использованием суммированных спектров мощности найдены периоды дрейфа P2 и P3 для 41 пульсара на склонениях от -9° до $+42^\circ$. Были смоделированы спектры мощности импульсов с заданным периодом, шириной импульсов и поведением дрейфа, показана применимость такого метода для оценки параметров дрейфа. Для большинства пульсаров распределение амплитуд гармоник в спектрах мощности соответствует ожидаемому распределению для этих пульсаров без дрейфа. В то же время было обнаружено, что для ряда источников суммарные спектры мощности, накопленные за длительный период времени, дают те же параметры дрейфа, что и те, которые были определены другими методами. Для 11 пульсаров определены или

переопределены периоды дрейфа Р2. Для 8 источников определен или переопределен период дрейфа Р3, а также переопределено направление дрейфа субимпульсов.

Глава 3. Поиск и исследование RRATs

3.1 Поиск RRATs

В 2006 году был обнаружен новый тип пульсаров, которые излучают спорадические диспергированные импульсы, в то время как регулярное (пульсарное) излучение у них обычно не фиксируется [15]. С тех пор за 15 лет после открытия обнаружено около сотни RRAT, в основном при анализе данных обзоров по поиску пульсаров (см. каталоги ATNF и RRATalog) на крупнейших радиотелескопах, таких, как Аресибо (300 м.), Грин-Бенк (100 м.), Паркс (64 м.) и БСА ФИАН (200x400 м.). Ключевой фактор при поиске RRAT - мгновенная чувствительность телескопа, определяемая эффективной площадью и, соответственно, размерами антенны. До настоящего времени остается невыясненным, какова природа этих объектов и какое место они занимают среди обычных пульсаров.

RRAT отличаются от обычных секундных пульсаров большими периодами и магнитными полями, располагаясь близко к линии смерти на зависимости P/\dot{P} [100], [101]. По этим наблюдаемым величинам, периоду вращения и первой производной периода, можно оценить возраст пульсара. По гипотезе авторов работы [102], вращающиеся радиотранзиенты могут представлять собой промежуточный класс между магнетарами (пульсары с сильными магнитными полями) и обычными пульсарам. По ряду характеристик, таких, как распределение высот над галактической плоскостью, распределение ширин импульсов, вращающиеся радиотранзиенты схожи с обычными пульсарам [103]. Интервалы между их импульсами варьируются от минут до десятков часов [15], [62]. Распределение энергии импульсов (логнормальное, степенное и др.) аналогично обычным пульсарам [104]. По оценкам, сделанным в работе [105], численность RRAT может вдвое превышать популяцию обычных секундных пульсаров.

Из-за малого числа обнаруженных RRAT и их спорадических импульсов природа вращающихся транзиентов остаётся неясной. Поскольку импульсы возникают непредсказуемо и редко, для изучения их свойств и проверки гипотез нужно увеличение общего количества этих объектов и длительные наблюдения (десятки и сотни часов на каждую точку неба). Мы предприняли попытку поиска диспергированных импульсов в нашем обзоре, проводившемся на радиотелескопе БСА ФИАН. Обзор проводился на антенне БСА1 на склонениях $+56^\circ < \delta < +87^\circ$, и за время наблюдений были накоплены данные, соответствую-

ющие непрерывным наблюдениям не меньше, чем 1 временной час для каждой точки неба в указанном диапазоне склонений.

Для поиска была разработана специальная программа на языке C# (Microsoft Visual Studio). Обработка данных для поиска импульсов с дисперсионным запаздыванием и сам поиск выполнялись поэтапно. Для выявления искомого события в записи находятся все импульсы, у которых для указанного набора мер дисперсий отношение сигнал/шум превышает заданный порог. Далее отсеиваются записи с помехами, с повторными обнаружениями одного и того же события, те участки, которые содержат записи с калибровочными ступеньками, сигналы от уже идентифицированных космических объектов, которые могут вноситься в отдельную таблицу и исключаться из дальнейшей обработки. После этого из оставшихся событий формируются группы, которые могут соответствовать одиночному сигналу с дисперсионным запаздыванием. В каждой такой группе программа оставляет только одно событие в виде графического файла с максимальным значением СШ. Этот файл содержит профиль импульса и его динамический спектр, СШ, координаты и другую информацию. Такой подход сильно сокращает объём данных для последующей визуальной обработки.

Используя описанную методику, нам удалось обнаружить 75 направлений на небе, испускающих диспергированные сигналы. Проведённый анализ позволил установить, что некоторые из этих импульсов получены от известных пульсаров, которые наблюдаются в основном луче, а некоторые из них - от известных пульсаров, наблюдаемых в боковых лепестках антенны, которые трудно поддаются отождествлению. Если в один день для таких пульсаров получено несколько импульсов, то есть возможность получить оценки периода и его кратность, что при наличии меры дисперсии позволяет провести отождествление известных пульсаров. Всего в ходе исследования нами было зарегистрировано 13 пульсаров, которые расположены за пределами наблюдаемой площадки. Один из таких пульсаров, J1509+5531, наблюдался в боковых лепестках антенны и зафиксирован 333 раза. На Рис. 3.1 приведен пример импульса пульсара J1509+5531. Верхняя часть рисунка показывает профиль одного импульса пульсара, нижняя – его динамический спектр.

Рис. 3.2 показывает координаты направлений на небе, из которых нами были зафиксированы диспергированные импульсы. 13 пульсаров, расположенных вне зоны исследуемой площадки и обнаруженных в боковых лепестках,

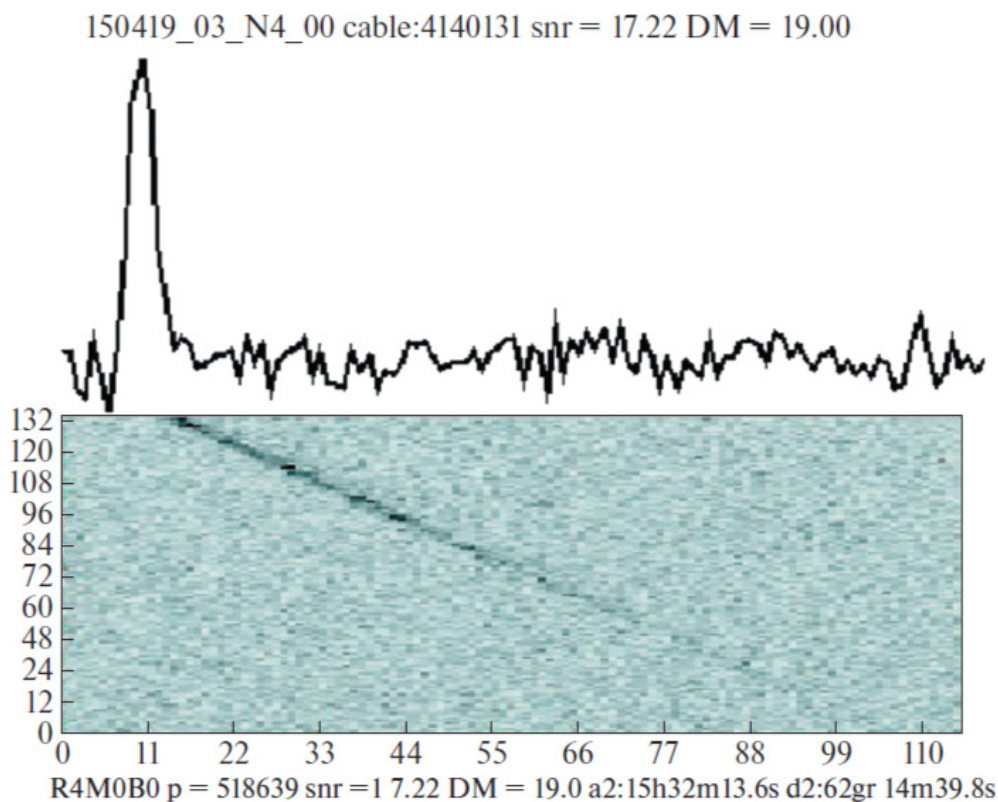


Рисунок 3.1 — Профиль и динамический спектр пульсара J1509+5531, наблюдаемого в боковом лепестке БСА. Горизонтальная ось показывает длительность записи в точках (примерно 338 мс записи в сырых данных), вертикальная — частоты (верх соответствует частоте 111.49 МГц, низ — 109.01 МГц). Рисунок взят из [106].

обозначены крестиками. Еще 12 известных пульсаров, наблюдавшихся в своих основных лучах, показаны закрашенными кружками. Отождествление таких пульсаров не является сложной задачей. Черным квадратом показан новый RRAT, обнаруженный в этой работе. Все оставшиеся импульсы оказались повторяющимися импульсами от известных пульсаров, наблюдавшихся в боковых лепестках.

Для нового RRAT и отождествленных известных пульсаров с помощью специально подобранных калибровочных источников удалось посчитать плотности потока. Калибровочные источники были выбраны из Пуцинского каталога дискретных источников [107], выполненного на частоте 102.5 МГц, таким образом, что их склонение должно быть близко к склонению исследуемого объекта, а разница в прямом восхождении не должна превышать двух временных часов. Согласно работе [108], поправки при пересчете плотности потока калибровочного источника на нашу частоту 111 МГц незначительны. При допущении,

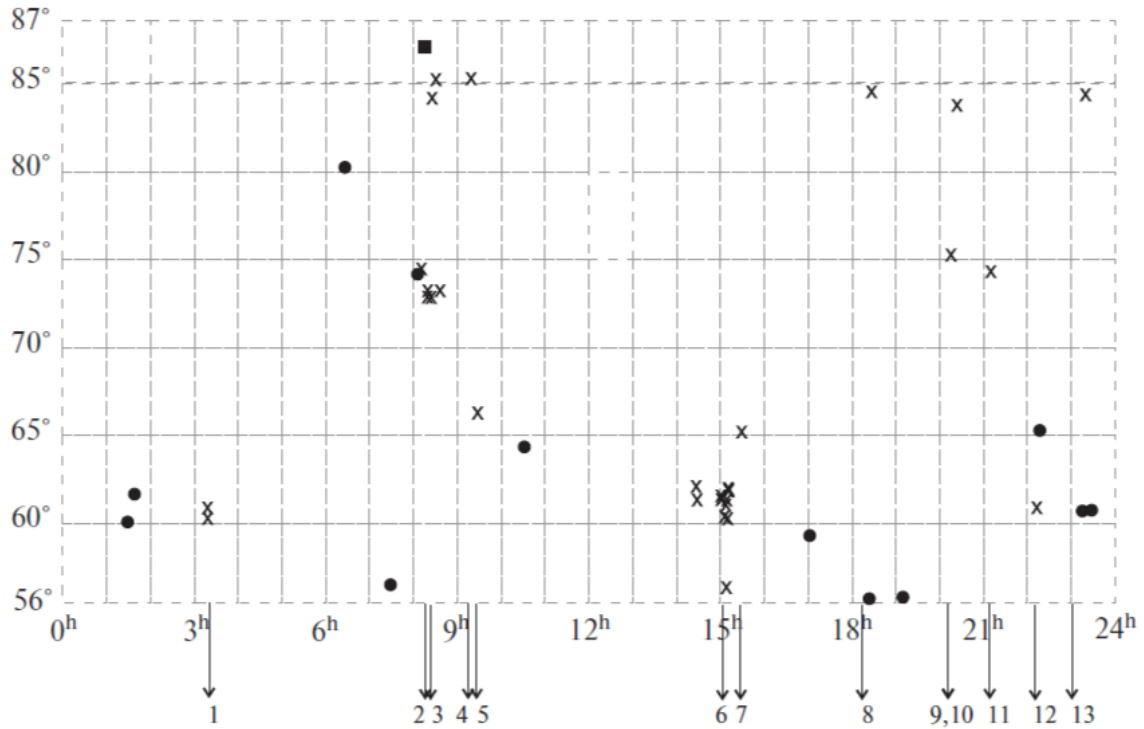


Рисунок 3.2 — Площадка обзора с отмеченными координатами обнаруженных в работе диспергированных импульсов. Горизонтальная ось показывает координаты по прямому восхождению, вертикальная – по склонению. Цифры от 1 до 13 в нижней части рисунка показывают пульсары, которые оказались за пределами площадки обзора и наблюдались в боковых лепестках антенны. Это следующие пульсары: 1 – J0332+5434; 2 – J0826+2637; 3 – J0837+0610; 4 – J0922+0638; 5 – J0946+0951; 6 – J1509+5531; 7 – J1543+0929; 8 – J1823+0550; 9 – J2022+2854; 10 – J2022+5154; 11 – J2113+2754; 12 – J2219+4754; 13 – J2305+3100. Рисунок взят из [106].

что спектральные индексы всех калибровочных источников равны единице, плотность потока на частоте 111 МГц составляет 0.94 от плотности потока на частоте 102.5 МГц. В итоге в качестве калибровочных источников были отображены следующие объекты: B0245+603 (44.3 Ян), B0733+806 (32.3 Ян), B0735+744 (12.6 Ян), B0742+576 (14.2 Ян), B1107+651 (12.0 Ян), B1656+572 (13.6 Ян), B1752+586 (10.0 Ян), B1858+568 (17.4 Ян), B2159+652 (28.1 Ян), B2356+620 (27.2 Ян).

Характеристики найденных импульсов для 12 известных пульсаров приведены в Таблице 12.

В 1 и 2 столбцах приводится имя пульсара, соответствующее обнаружению на БСА и каталогу ATNF, третий столбец отражает количество найденных в ос-

Таблица 12 — Характеристики известных пульсаров, зарегистрированных по отдельным импульсам. Таблица взята из [106].

$name_{LPA}$	$name_{ATNF}$	N	S_{p1} (Jy)	W_{e1} (ms)	S_{p2} (Jy)	W_{e2} (ms)	S_{int} (mJy)	S_{135} (mJy)	S_{102} (mJy)	S_{p1}/S_{p2}
J0140+6008*	J0141+6009	562	241.5	12.3	14.3	33.8	394	102.6	-	16.9
J0158+6223	J0157+6212	2	17.7	12.3	0.65	64.5	17.8	4.8	52	27.2
J0653+8054*	J0653+8051	15	15.5	6.1	0.7	27.6	16	13.1	16	22.1
J0750+5724	J0750+57(St)	1	>14	6.1	>0.27	24.6	>6	-	-	-
J0814+7436*	J0814+7429	62	781.4	6.1	56.3	61.4	2674	358.8*	1080	13.9
J1058+6504	J1059+6459(St)	3	4.2	12.3	0.62	33.8	5.8	-	-	6.8
J1708+5858	J1706+59(St)	24	>9.0	6.1	>0.55	58.4	>22	15.7	-	-
J1843+5640*	J1840+5640	757	235.4	6.1	21.4	21.5	275	55.0	50	11
J1911+5654	J1910+5655(S)	2	28.5	3.1	0.26	61.4	46.7	-	-	109
J2225+6527*	J2225+6535	94	55.5	3.1	6.0	27.6	242	126.3	-	9.3
J2336+6145*	J2337+6151	346	77.6	9.2	2.4	27.6	132.4	28.7	75	32.7
J2354+6158	J2354+6155	2	50.6	12.3	1.6	15.4	26	10.5	30	31.6

новном луче импульсов пульсара. 4 столбец – пиковая плотность потока самого сильного из найденных импульсов пульсара, в 5 столбце указана его полуширина, в 6 – пиковая плотность потока среднего профиля, который строился по данным той сессии, в которой и наблюдался этот сильнейший импульс, то есть он входит в состав среднего профиля. Его исключение из среднего профиля приводит к тому, что S_{P2} уменьшается примерно на 20%. В 7 столбце - полуширина среднего профиля. 8, 9 и 10 столбцы показывают величину интегральной плотности потока соответственно на частоте 111 МГц, 135 МГц [40] и 102.5 МГц [109]. И последний, 10 столбец показывает, во сколько раз плотность потока сильнейшего импульса (столбец 4) отличается от пиковой плотности потока (столбец 6) в среднем профиле за один и тот же день.

В 1 столбце звездочкой обозначены те пульсары, которые наблюдались как в своем основном луче, так и в боковых лепестках антенны. Во втором столбце метками «St» [110] и «S» [109] помечены пульсары, которые впервые были обнаружены в соответствующих работах, и мы подтверждаем обнаружение этих объектов на частоте 111 МГц. Для двух из этих пульсаров нам удалось уточнить значение мер дисперсий, которые мы определили по обнаруженным сильнейшим импульсам: J0750+57 $DM=26.75\pm 0.25$ пк/см³, J1706+59 $DM=30.5\pm 0.25$ пк/см³.

На Рис. 3.3 попарно показаны средние профили и сильнейшие импульсы всех 12 известных пульсаров, приведенных в Таблице 12. На рисунке видно, что

ширина средних профилей пульсаров больше ширины сильнейших импульсов, и величину этой разницы можно видеть из данных, показанных в столбцах 5 и 7 Таблицы 12. Самая большая разница наблюдается у пульсара J1910+5655 - в 19.8 раза.

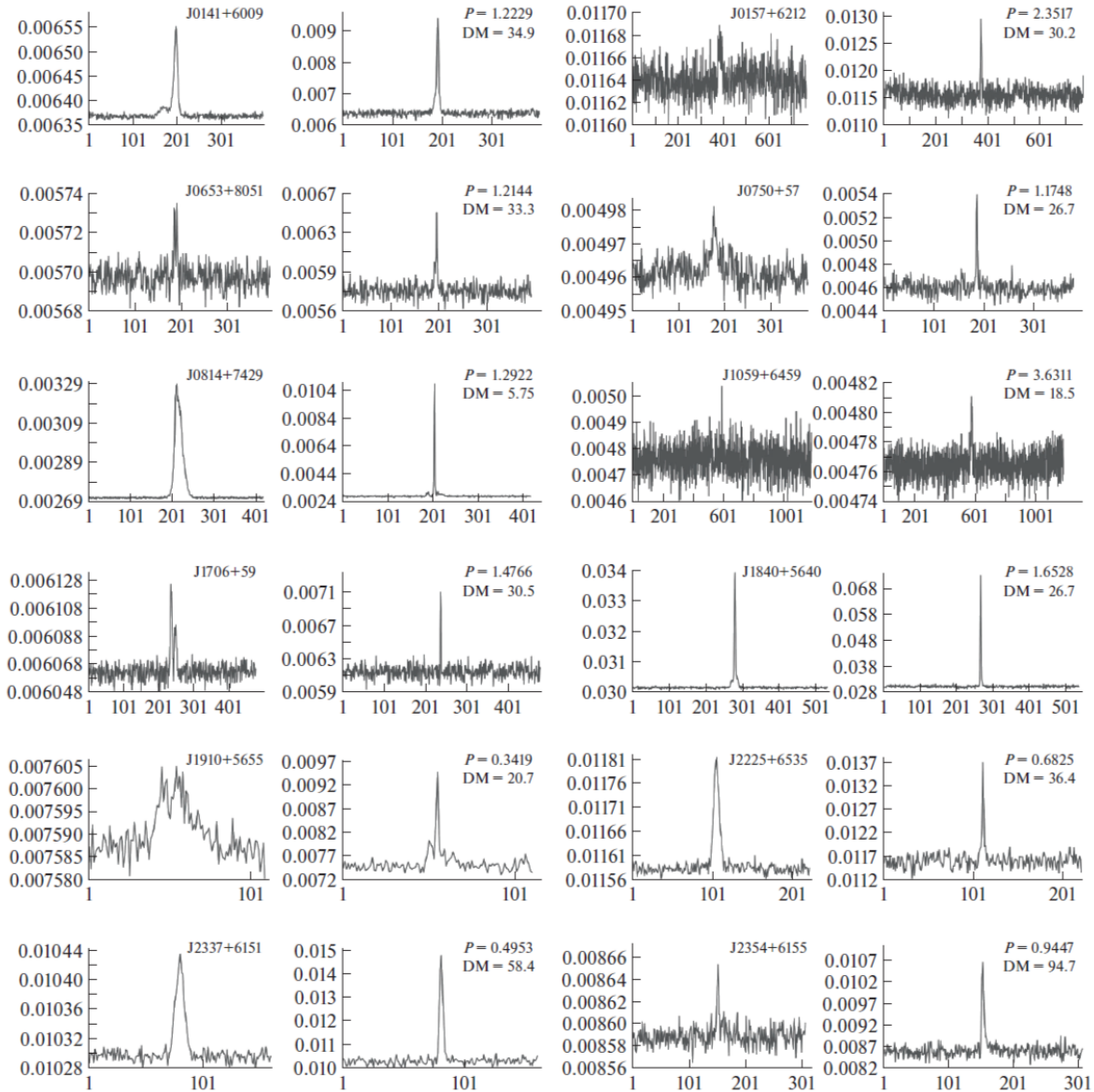


Рисунок 3.3 — Средние профили и профили сильнейших импульсов известных пульсаров, зарегистрированных в обзоре. Горизонтальная ось показывает длительность записи в точках, вертикальная - плотность потока в у.е., которые для парных рисунков приведены в одной шкале. Рисунок взят из [106].

Согласно работе [111], посвященной исследованию пульсаров с гигантскими импульсами (ГИ), существует ряд признаков, по которым обычный пульсар отличается от пульсара с ГИ. Два из этих признаков мы можем проверить для зарегистрированных в нашем обзоре пульсаров. Первый из них — это малень-

кая ширина ГИ по сравнению с шириной среднего профиля. Вторым признаком является отличие пиковой плотности потока ГИ от пиковой плотности потока профиля. Отличие в 10 раз является слабым критерием, а в 30 раз – сильным. Для двух пульсаров из Таблицы 12 эту оценку получить не удалось и для двух других отношение плотностей потока составляют менее 10 раз. Из оставшихся 8 пульсаров, соответствующих слабому критерию, 3 отвечают и сильному критерию. Таким образом, эти 3 пульсара являются перспективными кандидатами в пульсары с гигантскими импульсами. Для проверки требуются отдельные специальные исследования.

Как уже отмечалось выше, один из найденных источников, J0812+8626, оказался новым радиотранзиентом. Нам удалось обнаружить два импульса от этого объекта с мерой дисперсии $DM = (40.25 \pm 0.25)$ пк/см³, пиковой плотностью потока 10 и 4.5 Ян, расстоянием между импульсами 47.58 с и полушириной профиля 10 мс. Верхняя оценка интегральной плотности потока для этого RRAT составила 2 мЯн. Точные координаты для J0812+8626 не определены, так как появление импульсов источника является спорадическим, но мы можем привести формальные оценки координат, и они следующие: $\alpha_{2000} = 08^h 12^m 30^s \pm 2.5^m$, $\delta_{2000} = 86^\circ 26' \pm 15'$. На Рис. 3.4 показаны профиль сильнейшего импульса и динамический спектр, полученные для J0812+8626.

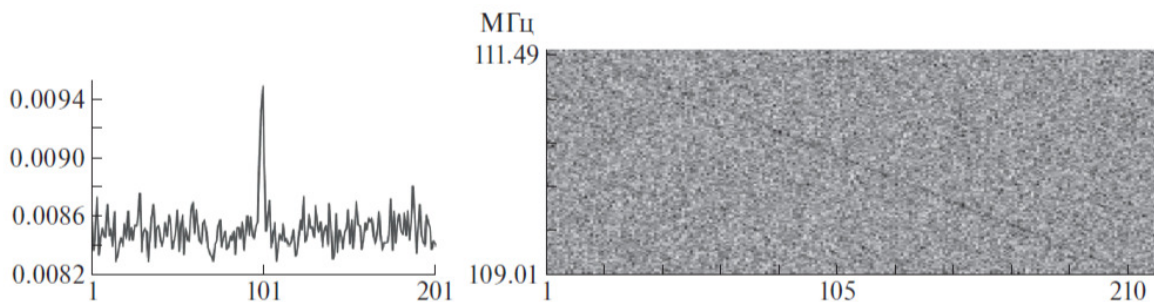


Рисунок 3.4 — Профиль сильнейшего импульса и динамический спектр, полученные для J0812+8626. Горизонтальная ось показывает длительность записи в точках, вертикальная слева – плотность потока в у.е, а справа – частоты наблюдений. Рисунок взят из [106].

3.2 Поиск RRATs с использованием нейронной сети

Первоначальный поиск диспергированных сигналов проводился следующим образом: сначала были отсортированы данные с мерами дисперсии от 3 до

100 пк/см³, затем для каждого отсортированного значения DM были просуммированы частотные каналы. Далее проводилась оценка среднеквадратичного отклонения шумов σ_n . Если в какой-то момент отношение сигнал/шум ($\text{СШ} = A/\sigma_n$, где A - амплитуда сигнала) на этой мере дисперсии превышал пятерку, то изображение динамического спектра и суммарный профиль сохранялись.

При используемом методе обработки сильные импульсы будут регистрироваться при разных значениях DM до тех пор, пока отношение сигнал/шум в собранном профиле остается выше установленного уровня. При значении DM, близком к фактическому, амплитуда профиля будет выше, а ширина профиля - меньше. Чем выше наблюдаемое отношение сигнал/шум для импульса, тем больше раз он будет обнаружен на разных DM и тем больше изображений одного и того же импульса будет сохранено в памяти.

При визуальном поиске при просмотре одного изображения динамического спектра в секунду полное время просмотра полугодовой обработки наблюдений в рамках поиска RRAT (6×10^5 изображений) займет 600 тысяч секунд или, приблизительно, один рабочий месяц. Эта работа была сделана действительно быстро, так как программа обработки может последовательно отображать все динамические спектры для заданного звездного времени с интервалом примерно в 3,5 минуты, позволяя также последовательно просматривать все лучи, и в каждом луче данные идут в порядке возрастания DM.

В процессе просмотра данных, когда мы быстро пролистываем динамические спектры, на экране видны наклонные линии, указывающие на сигналы с дисперсионной задержкой. Если мы замечаем наклонную линию при просмотре, то возвращаемся к этой картинке (или картинкам) и оцениваем характеристики импульса (координаты, DM). Эти характеристики позволяют нам произвести последующую идентификацию источника в ATNF.

В работе [112] говорилось, что при обработке полугодовых данных около четверти всех динамических спектров указывали на реальные импульсы пульсара и RRATs, а три четверти обнаруженных импульсов были связаны с помехами. Некоторые из этих помех подобны импульсам обычных пульсаров, имеющих меры дисперсии, как правило, в диапазоне от 3 до 10 пк/см³. Устранение таких помех основано на том факте, что эти сигналы могут наблюдаться одновременно во многих лучах, чего не бывает при обнаружении импульсов от пульсара или RRAT.

Нейронные сети могут быть использованы для уменьшения количества помех на визуально проверенных изображениях. Например, сверточные нейронные сети (CNN, convolutional neural networks), ранее использовавшиеся для анализа данных, полученных с помощью БСА ФИАН, показали высокую эффективность [113]. При обработке данных с использованием модели нейронной сети CNN временной ряд был разделен на кадры фиксированной длины, что и позволило использовать эту сеть, которая хорошо работает при поиске объектов на изображениях.

В представляемой работе на изображениях динамических спектров обнаруженный радиотранзиент представляет собой линию темных пикселей, начинающуюся в частотных каналах на высокой частоте и смещающуюся во времени к более низкой частоте. Величина наклона линии связана со значением DM. То есть, с точки зрения распознавания образов, у нас есть простые изображения линий с разными наклонами, которые сеть должна «видеть». Чем больше длина этой диагонали, тем больше DM, а это значит, что мы должны иметь возможность обрабатывать кадры разной длины с помощью сети. Однако на кадрах разной длины может наблюдаться резкое снижение качества CNN обучения и, следовательно, распознавания.

Модель нейронной сети, которую мы использовали, была написана на языке Python и основана на сквозной платформе машинного обучения Google Tensorflow4 с открытым исходным кодом. Для базовой разработки использовались библиотеки Pandas и NumPy. Обученная модель принимает тензор в унифицированном формате и преобразует его в результирующее значение в диапазоне от 0,00 (отрицательное/ложное) до 1,00 (положительное/истинное). Чтобы получить результирующее значение, которое по своей природе является логическим, нам нужно определить пороговое значение, при котором значения модели ниже интерпретируются как ложные, а значения выше интерпретируются как истинные. Таким образом, для окончательной настройки модели рассчитывается пороговое значение, позволяющее свести к минимуму количество ошибок типа I и типа II в тестовом наборе данных (подробнее будут рассмотрены далее). Окончательное тестирование модели проводилось на реальных данных с визуальной проверкой результатов работы модели.

Для построения сети мы отобрали приблизительно 9000 изображений из 6×10^5 , полученных в ходе обработки полугодовых наблюдений, и ввели в базу данных следующую информацию о типе: «ДА» означает, что мы видим радио-

транзиент на изображении; «НЕТ» означает, что мы видим помехи. У нас было примерно равное количество изображений «ДА» и «НЕТ». Эти изображения были разделены в соотношении $2/3$ и $1/3$, где $2/3$ изображений использовались для обучения сети (обучающие данные), а $1/3$ из них использовалась для тестирования сети после обучения (тестовые данные).

После обучения модели на основе тестовых данных были получены различные пороговые значения для принятия правильного решения, далее эти пороговые значения были протестированы на всех обработанных данных. Тестирование пороговых значений показало, что при уровне порога для принятия правильного решения, равном 0.8 , и при приемлемом количестве оставшихся помех наблюдается небольшое количество пропущенных радиотранзиентов.

После окончания процесса обучения сети образцы изображений, использованные для обучения, были удалены, и поиск радиотранзиентов был проведен по оставшимся выборкам кандидатов. Поскольку в новом поиске мы использовали ранее обработанные данные [112], а именно изображения динамических спектров и профилей импульсов, для каждого направления на небе уже было известно количество наблюдаемых помех и количество обнаруженных импульсов. Следовательно, после работы нейронной сети можно было просмотреть оставшиеся изображения и проверить, сколько помех сеть приняла за реальные импульсы, и сколько реальных импульсов сеть выбросила, считая их помехами. Другими словами, на практике можно оценить вероятность ложноположительного обнаружения (ошибка II типа) и вероятность пропуска реального сигнала (ошибка I типа).

При обработке данных наблюдений мы делим все небо на пиксели, размер которых немного меньше размера принимающего луча антенны БСА, и выполняем независимый поиск в каждом пикселе. Поскольку точная координата радиотранзиента неизвестна, его импульсы могут быть обнаружены в нескольких близлежащих пикселях по прямому восхождению и склонению. Для используемой конфигурации БСА вся доступная площадка неба состоит из 96 лучей, разделенных по склонению от -9° до $+42^\circ$ с расстоянием между лучами около 0.5° и расположенными в плоскости меридиана, а также из 422 фрагментов продолжительностью примерно 3.5 минуты по прямому восхождению: $(3.5 \times 422)/60 = 24$ ч. Таким образом, небо разделено на $96 \times 422 = 40\,512$ пикселей.

После работы нейронной сети выяснилось, что для 97% всех пикселей в среднем обнаруживается менее одной записи помех на пиксель. Почти у полови-

ны всех пикселей не осталось ни одного изображения динамического спектра. Среднее значение числа оставшихся помех на 96 пикселей (что соответствует 96 лучам в меридиане) равно 12.

В трех процентах записей на пиксель приходится от десятков до сотен помех. Оказалось, что при обучении нейронной сети мы пропустили один тип помех, и сеть принимает эти помехи за радиотранзиенты. Нам не удалось выяснить природу этих помех, но мы надеемся научиться устранять их с помощью дальнейших усовершенствований нейронной сети при обработке данных, накопленных за интервал в 7 лет. На Рис.3.5е представлены динамический спектр и средний профиль таких помех. Исключив из анализа 3% пикселей, мы получаем, что нейронная сеть удалила почти 99% всех помех, которые исходная программа обработки принимала за диспергированные импульсы.

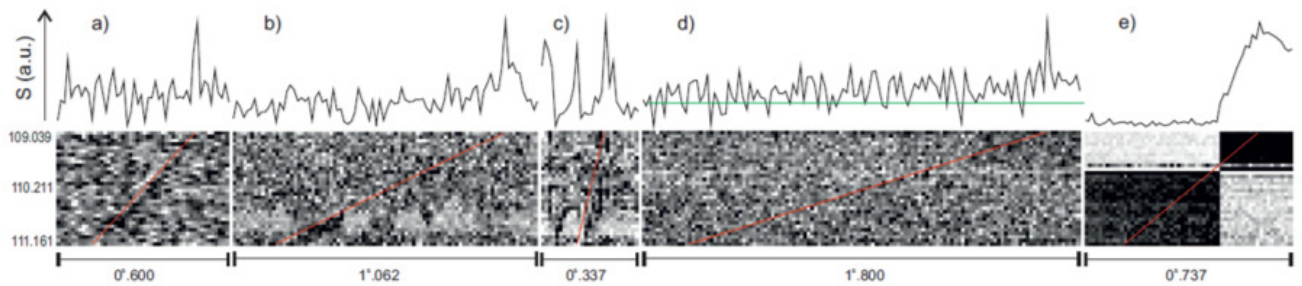


Рисунок 3.5 — Примеры помех, принятых нейронной сетью за радиотранзиенты. Нижняя часть рисунков представляет собой динамические спектры, красная линия на них проведена вдоль найденного потенциального значения RRAT, а степень наклона линии отражает величину DM. Над динамическим спектром отображается профиль, составленный с учетом ожидаемого значения DM. Продолжительность записи в секундах указана под каждым динамическим спектром. Частоты каналов показаны вертикально рядом с динамическим спектром, а рядом с профилем указана плотность потока в условных единицах. На рисунке d зеленым цветом показана базовая линия, по которой была рассчитана амплитуда сигнала. Рисунок взят из [114].

Во время визуальной проверки отобранные нейронной сетью кандидаты, показанные на Рис.3.5а-е, были отсеяны. Рассмотрим причины отсеивания этих кандидатов. Чтобы получить оценку СШ, необходимо вычислить среднеквадратичное отклонение σ_n . Программа обработки рассчитывала для каждого луча σ_n с интервалом в один час после выравнивания коэффициента усиления в частотных каналах, сложения их на $DM = 0$ пк/см³ и устранения импульсных

помех. Для профиля на Рис.3.5а оказалось, что $S/N \approx 5$. В опубликованных работах для найденных RRATs использовалось отношение $S/N \geq 7$. В поисковой программе были зарегистрированы кандидаты с $S/N = 5$. Практическая работа показала, что при $S/N = 5-6$ в динамическом спектре все еще видна наклонная линия из темных пикселей, отличающая кандидата на RRAT от помех. Если мы обнаруживали кандидата на RRAT с $S/N \geq 7$, то для подтверждения этого и поиска периода использовались более слабые импульсы, наблюдаемые в направлении кандидата. Для случая, рассмотренного на Рис.37а, среднеквадратичные отклонения шума на профиле, по-видимому, были немного выше значения, определенного на часовом интервале, и все же на изображении динамического спектра мы можем видеть наклонную линию. Мы не можем однозначно сказать, что наблюдаем помехи, но оценка СШ все еще меньше общепринятого в радиоастрономии критерия $CШ > 6-7$, что не позволяет нам публиковать такие RRATs в качестве новых открытых источников без дополнительных исследований. После того, как нейронная сеть обработала все изображения, осталось около 500-700 кандидатов с $CШ < 6$ и визуально обнаруживаемой линией задержки дисперсии. Мы отклонили все эти результаты как ненадежные. В то же время тот факт, что нейронная сеть находит кандидатов, которые визуально имеют слабо выраженную линию в динамическом спектре, свидетельствует о ее надежной работе. Мы уверены, что некоторые из этих кандидатов с $CШ < 6$ являются новыми кандидатами, и мы разрабатываем способы их подтверждения.

На Рис. 3.5b показан случай возникновения помех в частотной области. Программе обработки не удалось устранить эти частотные помехи. На Рис. 3.5c показаны помехи, которые наблюдались одновременно как в частотной, так и во временной областях. На Рис. 3.5d показан случай некачественного вычитания базовой линии программой обработки. Зеленая горизонтальная линия на профиле показывает, с какого уровня программа поиска определила СШ. По формальному признаку радиотранзиент обнаружен, но, во-первых, реальное отношение $CШ < 5$, и это видно по размеру шумовой дорожки. Во-вторых, линия, показывающая дисперсионный сигнал, визуально не видна. Это указывает на то, что профиль сигнала получен из небольшого числа пикселей, и косвенно указывает на ложное обнаружение радиотранзиента. В-третьих, наблюдаемый профиль состоит из одной точки. При предполагаемом $DM = 85$ пк/см³ минимальная ширина профиля за счет сглаживания дисперсии внутри частотного канала (ширина канала составляет 78 кГц, центральная частота на-

блюдений - 110,25 МГц) должна быть равна 4 точкам. При визуальном осмотре такие кандидаты легко исключаются. Нейронная сеть оставила этого кандидата как RRAT, «увидев», по-видимому, несколько ярких пикселей, выстроившихся вдоль красной линии.

На Рис. 3.5е показан тип помех, пропущенных во время обучения нейронной сети. Природа этих помех неясна. Их легко устранить при визуальном просмотре, и мы надеемся избавиться от такого рода помех при следующей итерации нейронной сети. Общее количество такого рода помех невелико по сравнению с общим количеством других помех. При обработке полугодовых данных было зафиксировано несколько тысяч таких помех.

Нейронная сеть также обнаружила новые импульсы известных сильных пульсаров, наблюдаемые в боковых лепестках антенны БСА, которые ранее во время нашего визуального поиска были пропущены. В предыдущем параграфе на Рис. 3.3 и в работе [106] показаны обнаруженные импульсы известных пульсаров, расположенных за пределами исследуемой области. Обнаружение ранее необнаруженных импульсов реальных пульсаров в боковых лепестках антенны еще раз свидетельствует о более высокой эффективности нейронной сети по сравнению с человеческим глазом.

Помимо помех и импульсов известных пульсаров, нейронная сеть обнаружила объекты, которые не удалось идентифицировать ни с известными пульсарами и RRATs, ни с помехами (Рис. 3.6). Найденные импульсы были обнаружены в одном луче и их СШ > 7 .

В Таблице 13 приведены характеристики обнаруженных импульсов. В первом столбце указано название источника, во втором и третьем столбцах указаны его координаты на 2000 год. Погрешность склонения для всех найденных источников определяется как половина расстояния между соседними лучами и равна $\pm 15'$. Погрешность прямого восхождения определяется как размер принимающего луча БСА при половинной мощности и равна ± 1.5 мин. В столбцах с 4 по 7 указаны мера дисперсии (DM), полуширины профилей ($W_{0.5}$), СШ самых сильных импульсов и пиковая плотность потока (S_{peak}). В восьмом столбце приведена верхняя оценка интегральной плотности потока (S_{int}). Поиск регулярного излучения пульсара в направлении найденного RRAT для получения оценки S_{int} был выполнен с использованием суммированных спектров мощности и периодограмм [41]. Для поиска были использованы данные мониторинга, для которых полная полоса частот составляла 2.5 МГц, ширина частотного канала

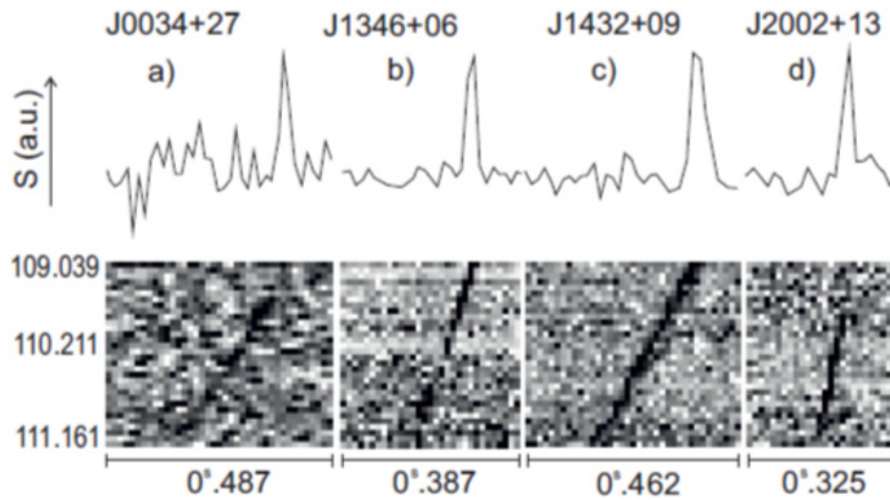


Рисунок 3.6 — Профили и динамические спектры новых RRAT, обнаруженных в поиске. Вертикальная ось на верхней части показывает плотность потока в у.е., а на динамических спектрах - частоты каналов. По горизонтальной оси под каждым динамическим спектром показана продолжительность записи в секундах. Рисунок взят из [114].

- 78 кГц, а время дискретизации одной точки составляло 12.5 мс. Отсутствие сигналов с известным DM в суммированных спектрах мощности позволило нам дать более высокие оценки S_{int} . Максимальные оценки S_{peak} и верхние оценки S_{int} могут быть занижены, поскольку координаты предполагаемых RRATs известны с большой погрешностью, и мы не можем внести поправки в плотность потока, учитывающие возможное расхождение направления к центру луча БСА и направления к источнику. Значения, указанные в столбцах 7 и 8, могут быть в 1.5-2 раза выше. Чувствительность при поиске обычного излучения пульсара зависит от многих факторов: ширины частотного канала, длительности импульса, длины волны и т.д. [41]. Наши верхние оценки интегральной плотности потока даны в предположении, что период пульсара $P > 0.5$ с.

Девятый столбец содержит информацию о количестве возможных импульсов RRAT, обнаруженных нейронной сетью при просмотре изображений динамических спектров, полученных в ходе обработки полугодовых наблюдений (N1). Для подтверждения обнаруженных импульсов мы обработали данные за период с августа 2014 по декабрь 2019 года. N2 в девятом столбце - это общее количество импульсов, найденных в ходе специального поиска за интервал в 5.5 лет. Поиск проводился до значения $S/N \geq 5$. Уровень $S/N \geq 6$ считался надежным при условии визуального обнаружения линии, имеющей дисперсионный

Таблица 13 — Характеристики найденных радиотранзиентов. Таблица взята из [114].

Имя	α_{2000} h m s	δ_{2000} ° ′	DM пк/см ³	$W_{0.5}$ мс	S/N	S_{peak} Ян	S_{int} мЯн	N_1/N_2	n
J0034+27	00 34 57	27 47	16	18	7.0	2.4	<0.17	1/2	0.017
J1346+06	13 46 11	06 10	9	22	12.6	5.8	<0.23	1/10	0.085
J1432+09	14 32 30	09 08	14	40	20.0	8.6	<0.22	1/2	0.017
J2002+13	20 02 07	13 03	5	22	8.0	4.8	<0.30	1/3	0.026

сдвиг в частотных каналах динамического спектра. Десятый столбец показывает частоту появления импульсов (n) с учетом новых импульсов, обнаруженных в ходе их целенаправленного поиска в течение интервала в 5,5 лет.

Для радиотранзиента J0034+27 было обнаружено 6 импульсов с выраженной линией дисперсионных задержек. Из этих 6 импульсов 2 имеют СШ ≥ 6 на интервале 5.5 лет. Принимая во внимание прохождение источника через луч БСА на половинной мощности в течение 3-4 минут, один импульс с порогом обнаружения $S/N \geq 6$ для этого RRAT принимается за время, эквивалентное 50-60 часам непрерывных наблюдений;

Для транзиента J1346+06 было обнаружено 26 импульсов, из которых 10 импульсов имеют СШ ≥ 6 и три импульса имеют СШ > 10 ;

Для транзиента J1432+09 было обнаружено 8 импульсов, из них 2 импульса с СШ ≥ 6 ;

Для транзиента J2002+13 было обнаружено 17 импульсов, из них 3 импульса с СШ ≥ 6 .

На сегодняшний день в ПРАО обнаружен 101 вращающийся радиотранзиент, 64 из них - с участием автора диссертации. После обнаружения этих RRATs по спорадически появляющимся импульсам было обнаружено, что некоторые из них имеют обычное излучение пульсаров. Возникает естественный вопрос о том, что такое вращающийся радиотранзиент и чем он отличается от обычного пульсара?

Выше уже отмечалось, что RRATs, как и обычные пульсары, могут иметь различную природу и одинаковые внешние проявления в виде нерегулярно появляющихся импульсов. Согласно работе [83], RRATs могут быть обычными пульсарами с необычно длинным хвостом на гистограмме распределения импульсов по энергии. В этом случае регулярное излучение пульсара может быть

слишком слабым, чтобы его можно было зарегистрировать во время сеанса наблюдения, но можно обнаружить сильные импульсы из хвоста распределения.

Дополнительным примером, косвенно подтверждающим гипотезу [83], являются исследования по поиску рассеянных импульсов, проводимые на близких частотах (111 МГц [112] и 135 МГц; [40]). Некоторые из источников (J0317+13, J1404+11, J1848+15, J2051+12, J2209+22), определенные как RRAT на БСА ФИАН, были обнаружены как обычные пульсары с отдельными сильными импульсами в обзоре LOTAAS. Такая ситуация сложилась из-за того, что в ходе двухчасового сеанса наблюдения в рамках исследования LOTAAS чувствительность наблюдений была в 2-4 раза выше, чем во время 3.5-минутного сеанса наблюдения на БСА ФИАН [41], что позволило зарегистрировать найденные в Пуццино RRATs как обычные пульсары секундной длительности. Таким образом, нет никаких сомнений в том, что гипотеза [83] справедлива для некоторой части RRATs.

3.3 Влияние межпланетных мерцаний на статистику импульсов пульсаров.

Как известно, пульсары были обнаружены в ходе исследования межпланетной плазмы путем наблюдения за мерцанием компактных радиоисточников [1]. Мерцание - это случайный процесс, и поэтому время между отдельными пиками в записи может изменяться случайным образом. В метровом диапазоне длин волн типичное время мерцания составляет порядка 1 с. Следовательно, импульсы секундных пульсаров при записи с использованием постоянной времени 0,5 с могут быть перепутаны с мерцаниями. Однако наблюдения с меньшей постоянной времени показали, что пики «мерцаний» - импульсов пульсара - находятся на одинаковом временном интервале друг от друга и, следовательно, не могут быть результатом случайного процесса.

Несмотря на открытие пульсаров фактически методом межпланетных мерцаний при изучении межпланетной среды, пульсары не внесли особого вклада в ее изучение. Это связано с тем, что, как правило, интегральная плотность потока пульсара невелика, и для наблюдений пульсаров как компактных радиоисточников постоянного излучения, которые просвечивают сквозь межпланетную плазму, необходимы антенны с высокой чувствительностью. Так, в каталоге мерцающих радиоисточников Северного полушария [115], полученном на частоте 81,5 МГц, из 1789 компактных источников только 17 идентифици-

рованы с пульсарами. При изучении межпланетной среды гораздо выгоднее использовать ядро квазара или радиогалактики в качестве источника, который просвечивает плазму на луче зрения, а не пульсар.

Существует очень мало ранних работ, в которых пульсары специально использовались для исследования межпланетной плазмы. Отметим только одну из них, в которой пульсары используются в качестве источников с очень малыми угловыми размерами [116]. Авторы проводили наблюдения межпланетных мерцаний пульсаров J0953+0755 и J0528+2200 на частоте 318 МГц. Для пульсара J0953+0755, который имеет меру дисперсии $DM \approx 3$ пк/см³, межзвездная среда практически не рассеивает импульсы, а индекс мерцания $m(\epsilon)$, зависящий от элонгации (ϵ - угол между направлением на Солнце и на источник при наблюдении с Земли), достигает максимума и остается постоянным (см. рис. 3 в работе [116]). Для пульсара J0528+2200 с мерой дисперсии $DM \approx 51$ пк/см³ межзвездная среда рассеивает импульсы, превращая пульсар в точечный объект для наблюдателя. Зависимость $m(\epsilon)$ достигает максимума, а затем уменьшается к малым элонгациям (см. рис. 4 в работе [116]). Численные расчеты для межпланетных мерцаний показывают именно такое поведение $m(\epsilon)$ для точечных и неточечных источников [117]. Для точечного источника индекс мерцания на максимуме (в зоне фокусировки) может превышать единицу [118].

В последние годы появились работы ([112], [68]), указывающие на возможность использования межпланетной плазмы в качестве усилителя сигналов от RRATs. RRATs, являющиеся подвыборкой пульсаров, были обнаружены как источники импульсного излучения, имеющие дисперсионную задержку сигнала из-за его прохождения в межзвездной среде ([15]). Импульсное радиоизлучение не регистрируется при большинстве вращений пульсара. В работе [112] было показано, что межпланетная среда может усиливать проходящие через нее сигналы в 1,5-2 раза. Предполагаемое количество RRATs в Галактике в два раза превышает количество обычных пульсаров [105]. В каталоге пульсаров ATNF [25] на момент публикации статьи, на основе которой написана глава, насчитывалось около 3000 радиопулсаров, из них - всего около ста вращающихся радиотранзиентов. Очевидно, что дефицит не обнаруженных RRATs очень велик. Для слабых RRATs, импульсы которых находятся за пределами порога обнаружения в метровом радиодиапазоне, усиление сигнала, приводящее к увеличению амплитуды импульсов, может быть единственным способом их обнаружения.

В работе [68] были исследованы импульсы 16 RRAT на частоте 111 МГц и было обнаружено, что для шести из них количество наблюдаемых импульсов $N(\epsilon)$ увеличивается от 2 до 10 раз на $\epsilon = 30^\circ \pm 10^\circ$. При изучении этого эффекта было доказано, что увеличение количества наблюдаемых импульсов связано с видимым увеличением плотности потока слабых импульсных сигналов на межпланетной плазме.

Однако существуют три различных проявления межпланетных мерцаний, связанных с прохождением импульсов пульсара через межпланетную плазму. Во-первых, некоторые из невидимых нами импульсов, сигнал от которых находится ниже порога обнаружения, усиливаются за счет мерцаний и становятся заметными. Как отмечалось выше, этот эффект был опубликован в статье [68], но его детальное изучение в упоминаемой работе не проводилось. Во-вторых, если происходит увеличение или уменьшение энергии отдельных импульсов, связанных с межпланетной средой, то можно говорить об индексе мерцания, отражающем эти изменения в числовой форме. Разработанного метода оценки индекса мерцаний $m(\epsilon)$ по наблюдениям отдельных импульсов пульсаров на сегодняшний день не существует. Измерения $m(\epsilon)$ по отдельным импульсам будут отличаться от измерений в работе [116], где пульсар рассматривался как компактный радиоисточник с постоянным радиоизлучением. В-третьих, если количество импульсов с разной энергией изменяется из-за межпланетных мерцаний, то должно возникнуть искажение зависимости распределения импульсов пульсара от энергий. Рассмотрим подробнее все эти три эффекта.

RRATs испускают импульсы нерегулярно, и между соседними импульсами могут проходить часы. Поэтому для определения количества импульсов, необходимого для анализа, требуется много времени. Наблюдения за RRAT и пульсарами проводились на БСА ФИАН в течение 8 лет. Для исследования были выбраны два RRAT (J0609+16, J1132+25) и один пульсар (B0320+39), ранее обнаруженные на этой антенне ([68], [119]).

Рассмотрим эффекты прохождения импульсного излучения через межпланетную среду с физической точки зрения. Количество наблюдаемых импульсов RRAT в соответствии с [68] увеличиваются на элонгациях $20^\circ - 40^\circ$ (оптимальные элонгации для метровых длин волн). Эти элонгации соответствуют максимуму на зависимости $m(\epsilon)$ для обычных компактных радиоисточников. Наши рассуждения, объясняющие увеличение числа наблюдаемых импульсов, были следующими. Для пульсаров обычно наблюдаются только самые сильные

импульсы. Чем слабее импульсы пульсара, тем больше их можно обнаружить. Межпланетное мерцание усиливает и ослабляет импульсы, которые находятся выше и ниже порога их обнаружения.

Увеличение числа обнаружений недетектируемых из-за мерцаний импульсов должно наблюдаться, если распределение энергии является убывающей функцией. Это приведет к увеличению количества обнаруживаемых импульсов в целом. Однако ситуация не так проста, как кажется. Даже для изученных нами RRATs заметное увеличение количества обнаруженных импульсов наблюдалось только для 6 из 16 исследованных [68]. Распределение энергии импульсов в пульсарах чаще всего подчиняется логнормальному закону, иногда наблюдается экспоненциальный хвост (см., например, [120]). Логнормальное распределение для пульсара B0320+39 можно условно разделить на три участка (Рис. 3.7а), границы которых для каждого пульсара будут определяться различными отношениями сигнал/шум. Пульсары J0609+16 и J1132+25 имеют распределение мощности со спектральными показателями -4 и $-6,5$ (Рис. 3.7 б и с).

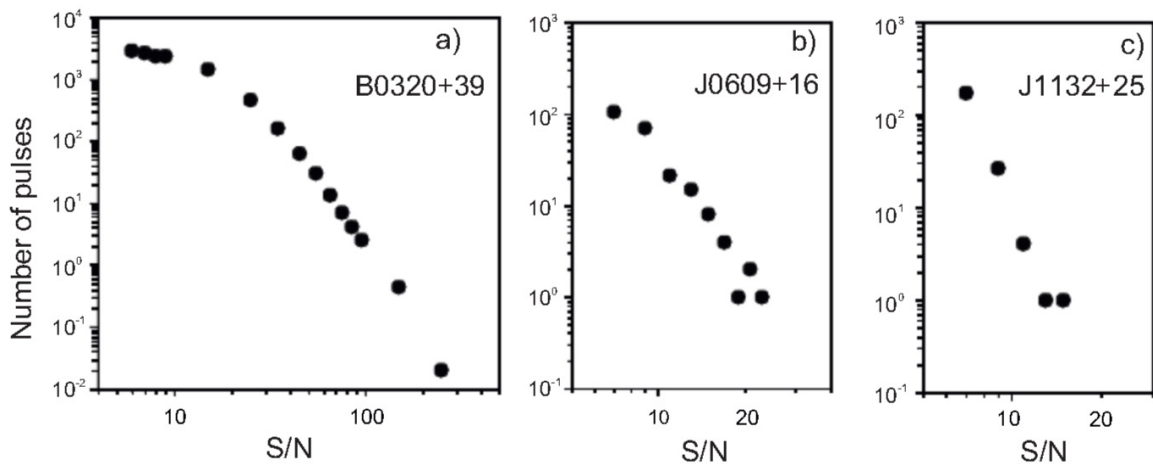


Рисунок 3.7 — Распределение энергии импульсов для пульсара B0320+39 и для двух RRATs (J0609+16; J1132+25). По вертикальной оси отложено количество обнаруженных импульсов, по горизонтальной - отношение сигнал/шум для этих импульсов. Рисунок взят из [121].

Очевидно, что для разных участков распределения энергии импульсов пульсара B0320+39 эффекты, описанные выше, будут проявляться по-разному. Качественно ясно, что в области $S/N > 20$ распределение должно выравниваться. В верхней части распределения не должно быть никаких изменений (на

плоском участке). В области $S/N < 7$ должно наблюдаться увеличение крутизны распределения.

Баланс наблюдаемого количества импульсов зависит от типа распределения энергии импульса. В случае степенного распределения со степенным индексом $\alpha > 1$ общее число наблюдаемых импульсов всегда будет выше, чем оно было бы при отсутствии межпланетной среды. Если распределение является логнормальным и в нем виден пик, то при наличии межпланетной среды баланс должен быть изменен на противоположный. То есть общее наблюдаемое количество импульсов будет меньше, чем при отсутствии межпланетной плазмы. Однако, каким бы ни был баланс, наблюдаемое распределение энергии импульсов должно быть искажено.

Поскольку пульсары, как правило, являются слабыми объектами, и отдельные импульсы наблюдаются в очень малой их части, чаще всего пик в распределении не наблюдается. В этом случае необнаруживаемых импульсов будет больше, чем обнаруживаемых, даже при логнормальном распределении. Следовательно, преобразование необнаруживаемых импульсов в обнаруживаемые импульсы должно привести к общему увеличению числа наблюдаемых импульсов. Чтобы получить правильную оценку количества полученных или потерянных «дополнительных» импульсов, необходимо знать распределение энергии импульсов и предел чувствительности радиотелескопа. Как показано в работе [68], вклад дифракционных (кратковременных) мерцаний в изменение плотности потока импульсов для исследуемого RRAT отсутствует из-за сильного сглаживания в широких частотных каналах.

Типичное время рефракционных мерцаний в метровом диапазоне длин волн составляет десятки и сотни дней. При интервале регистрации пульсара на БСА ФИАН в несколько минут рефракционные мерцания будут в равной степени усиливать или ослаблять все наблюдаемые импульсы. Таким образом, основные изменения будут связаны с их собственными вариациями в плотности потока импульсов. Эти вариации отражаются на распределении энергии импульсов и должны приниматься во внимание при оценке индекса мерцаний.

Рассмотрим аналитические выражения, которые позволили нам количественно оценить вышеописанные эффекты (подробнее о получении формул см. [121]).

$$N_{obs} = N_0 + \Delta N = N_0[1 + 2m(\alpha - 1)] \quad (3.1)$$

$$m = \frac{N_{obs} - N_0}{2(\alpha - 1)N_0} \quad (3.2)$$

Здесь N_{obs} - общее наблюдаемое количество импульсов, N_0 - общее количество обнаруженных импульсов без учета мерцаний, α - степенной индекс, m - индекс мерцания. Значение введенного нами эффективного параметра m не равно классическому показателю мерцания m_0 , но мы можем ожидать приблизительной пропорциональности между этими двумя значениями [121]. ΔN - полное изменение количества импульсов, зарегистрированных за сеанс. Величина ΔN существенно зависит от формы функции распределения энергии. В случае монотонно растущего распределения наблюдаемое количество импульсов будет уменьшаться из-за мерцаний. В случае монотонно убывающего распределения мерцания приводят к увеличению количества импульсов. При немонотонном распределении, в зависимости от конкретного типа функции распределения энергии, может наблюдаться как увеличение, так и уменьшение количества импульсов. В этом случае изменение количества импульсов, пропорциональное показателю мерцания, будет зависеть от углового расстояния между пульсаром и Солнцем. Для выбранных нами для исследования RRATs, согласно [68], функция распределения энергии имеет убывающую степенную форму.

Для пульсаров функция распределения обычно немонотонна и является логнормальной или логнормально нормальной со степенным хвостом. В этом случае соотношение между N_{obs} и m будет более сложным, чем в уравнении 3.1, поскольку оно определяется конкуренцией между импульсами повышенной и пониженной интенсивности из-за мерцаний [121].

Для оценки индекса мерцаний были выбраны два RRATs, демонстрирующие заметное увеличение числа наблюдаемых импульсов на элонгациях, оптимальных для наблюдений в метровом диапазоне длин волн. Для расчета индекса мерцаний использовалось уравнение 3.2. Среднее число наблюдаемых импульсов вне зоны оптимальных элонгаций было принято как N_0 . Распределение энергии импульсов для этих RRATs оказалось степенным, и наблюдаемый участок в распределении энергии импульсов в логарифмическом масштабе представляет собой прямую линию, а спектральный индекс α определяет угол наклона этой прямой линии. Мы посчитали индексы мерцаний. Полученные зависимости $m(\epsilon)$ приведены на Рис. 3.8.

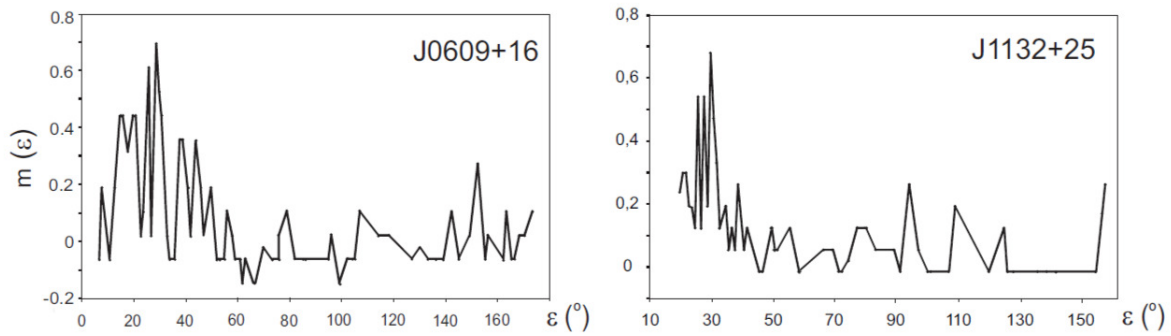


Рисунок 3.8 — На левой и правой панелях показаны зависимости индекса мерцаний от элонгаций для RRATs J0609+16 и J1132+25. По вертикальной оси отложено значение $m(\epsilon)$, по горизонтальной - значение ϵ . Рисунок взят из [121].

Рис. 3.8 показывает сильные скачки в зависимости $m(\epsilon)$ на элонгациях $\epsilon = 30^\circ \pm 10^\circ$. Мы предполагаем, что это связано с тем, что количество наблюдаемых импульсов, в том числе при оптимальной длительности, невелико. Следовательно, даже небольшие изменения в количестве наблюдаемых импульсов приводят к большим ошибкам в зависимости $m(\epsilon)$.

Как было показано выше, в области малых отношений S/N при оптимальных длительностях обнаруживаемые импульсы должны быть преобразованы в недетектируемые, тем самым уменьшая общее количество импульсов. На Рис. 3.9 показано такое поведение сильного пульсара V0320+39. Уменьшение наблюдаемого количества импульсов в марте-июне из-за межпланетных мерцаний для этого пульсара связано с тем, что основной вклад в вариации вносит растущая часть распределения энергии импульса (левый участок на Рис. 3.7.). Для сглаживания зависимости на левой панели проводилось сложение наблюдаемого количества импульсов с интервалами в три дня. При построении зависимости на правой панели, когда элонгации совпадали до и после прохождения минимальных элонгаций, проводилось усреднение.

На левой части Рис. 3.9 показано, что среднее количество импульсов пульсара V0320+39 составляет приблизительно 100 и уменьшается в 2-3 раза в апреле-июне. В мае пульсар проходит через $\epsilon = 20^\circ - 25^\circ$, и количество наблюдаемых импульсов падает ниже 50. Из правой части рисунка видно, что минимальное количество импульсов регистрируется при небольших элонгациях. Чтобы получить зависимость, количество обнаруженных импульсов было усреднено до и после прохождения минимальной элонгации, наблюдаемой для

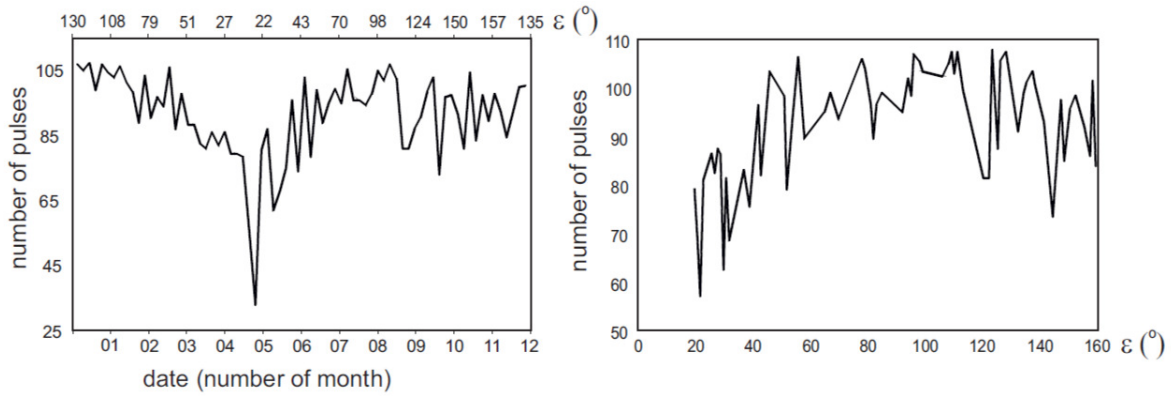


Рисунок 3.9 — На левой части рисунка показано количество наблюдаемых импульсов (вертикальная ось) от даты (горизонтальная ось) для пульсара B0320+39. Дата отображается в виде номера месяца. На правой части показано количество наблюдаемых импульсов (вертикальная ось) в зависимости от элонгации (горизонтальная ось). Рисунок взят из [121].

этого пульсара. Для логнормального распределения аналитическое выражение, описывающее поведение функции распределения энергии импульса на разных участках, получить не удалось, и поэтому индекс мерцания для B0320+39 не был получен.

Для пульсара B0320+39 показано, что при одинаковых элонгациях может наблюдаться уменьшение количества наблюдаемых импульсов в несколько раз. Как показано выше, увеличение или уменьшение количества регистрируемых импульсов зависит от распределения энергии импульсов. Если самые слабые наблюдаемые импульсы в распределении попадают на монотонно убывающую часть зависимости, то количество наблюдаемых импульсов будет увеличиваться. Если в распределении виден максимум, а затем наблюдается уменьшение количества регистрируемых импульсов, то при $\varepsilon = 30^\circ \pm 10^\circ$ будет обнаружено меньше импульсов, чем за пределами этой зоны элонгаций.

Рассматриваемый эффект будет сильнее для слабых пульсаров, у которых не видно многих отдельных импульсов. Если пульсар сильный и у него есть все или почти все импульсы, межпланетная среда исказит распределение импульсов по энергии, но не добавит новых импульсов. В случае логнормального распределения энергии импульсов правая часть распределения (область, содержащая сильные импульсы) сглаживается, левая (область, содержащая слабые импульсы) становится более крутой. Поэтому некорректно сравнивать распределения, полученные на разных частотах. Для корректного сравнения распределений необходимо предварительно удалить наблюдения с датами, на которые при-

ходятся оптимальные элонгации. Для рассматриваемых нами наблюдений это даты, соответствующие $\varepsilon = 20^\circ - 40^\circ$.

3.4 Выводы к Главе 3

1. Поиск диспергированных импульсов привел к обнаружению 12-ти источников импульсного излучения, являющихся известными пульсарами, и одного нового RRAT (J0812+8626). Для двух пульсаров мы уточнили оценку меры дисперсии. Исследования полуширин средних профилей и сильнейших импульсов обнаруженных пульсаров показали, что три из них могут оказаться пульсарами с гигантскими импульсами.
2. Проведен поиск RRAT в полугодовых мониторинговых данных на антенне БСА ФИАН, в результате которого были открыты 4 новых радиотранзиента. Использование нейронной сети показало, что с ее помощью можно уменьшить количество помех в просматриваемых данных в 80 раз, а потери реальных импульсов пульсаров не превышает 6% от их общего числа.
3. Рассмотрено влияние межпланетной плазмы на проходящее через нее импульсное излучение пульсара. Проанализированы импульсы двух вращающихся радиотранзиентов (RRAT) (J0609+16, J1132+25) и пульсара (B0320+39), обнаруженные на БСА ФИАН. Показано, что при наблюдениях на частоте 111 МГц на элонгациях $20^\circ - 40^\circ$ наблюдается как увеличение, так и уменьшение количества принимаемых импульсов. Изменение количества импульсов объясняется искажением распределения энергии импульсов из-за межпланетных мерцаний. Получены аналитические выражения, позволяющие оценить индекс мерцаний по результатам наблюдений отдельных импульсов для распределения мощности импульсов по энергиям. Данные наблюдений находятся в хорошем качественном согласии с известными характеристиками межпланетных мерцаний.

Заключение

Диссертационная работа посвящена поиску пульсаров и радиотранзиентов на радиотелескопе БСА ФИАН методами, разработанными с участием диссертанта, а также исследованию свойств найденных объектов. Показано, что ожидаемая (теоретическая) чувствительность проводимого нами обзора с суммированием спектров мощности и периодограмм при использовании 32-канальных данных и времени опроса 12.5 мс на одну точку сырых данных примерно на порядок превосходит чувствительности всех проведенных ранее и текущих обзоров, за исключением обзора GPPS, проводимого на 500-метровом телескопе FAST, где чувствительности сравнимы.

Дана верхняя оценка интегральной плотности потока для пяти гамма-пульсаров.

Исследовано дрейфовое поведение импульсов пульсаров. Для поиска периодов дрейфа рассмотрены суммарные спектры мощности известных пульсаров, полученные в процессе обработки данных проводимого на радиотелескопе БСА мониторинга. Проведено исследование влияния межпланетной среды на излучение пульсаров. Рассмотрены три проявления межпланетных мерцаний на статистике наблюдаемых импульсов пульсаров: изменение количества наблюдаемых импульсов, искажение распределения количества импульсов по энергии, зависимость индекса мерцания от наблюдаемой элонгации. Получены аналитические выражения, позволяющие оценить индекс мерцаний.

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Проведен поиск пульсаров методом усреднения спектров мощности. Найдено 253 известных пульсара, занесенных в каталог ATNF, а также 79 новых пульсаров. Периоды найденных пульсаров находятся в интервале от 0.08 с до 3.8 с. Меры дисперсии находятся в интервалах от 5 ± 3 пк/см³ до 154 ± 5 пк/см³. Проведено сравнение плотностей потоков с теоретическими оценками и показано, что чувствительность при поиске вырастает до 28 раз.
2. Методом суммирования спектров мощности и периодограмм проведен поиск радиоизлучения в метровом диапазоне длин волн для пяти гамма-пульсаров. Периодическое излучение найдено для одного из них в

одном сеансе наблюдений. Для пяти гамма-пульсаров получена верхняя оценка интегральной плотности потока.

3. Смоделированы спектры мощности импульсов пульсаров с заданным периодом, шириной импульсов и поведением дрейфа, показана применимость такого метода для оценки параметров дрейфа субимпульсов. Для 11 пульсаров определены или переопределены период дрейфа P_2 . Для 8 источников определен или переопределен период дрейфа P_3 , а также определено направление дрейфа субимпульсов.
4. Проведен поиск диспергированных импульсов, принадлежащих вращающимся радиотранзиентам. Найдены импульсы от 12 известных пульсаров и от 5 новых транзиентов. Использование нейронной сети показало, что с ее помощью можно уменьшить количество помех в просматриваемых данных в 80 раз, а потери реальных импульсов пульсаров не превышают 6% от их общего числа.
5. Рассмотрено влияние межпланетной плазмы на проходящее через нее импульсное излучение пульсара. Проанализированы импульсы двух вращающихся радиотранзиентов (RRAT) (J0609+16, J1132+25) и пульсара (B0320+39), обнаруженные на БСА ФИАН. Показано, что при наблюдениях на частоте 111 МГц на элонгациях 20° - 40° наблюдается как увеличение, так и уменьшение количества принимаемых импульсов. Изменение количества импульсов объясняется искажением распределения энергии импульсов из-за межпланетных мерцаний.

Список литературы

1. *Hewish A., Bell S.J., Pilkington J.D.H. et al.* Observation of a rapidly pulsating radio source // *Nature*. — 1968. — Vol. 217. — Pp. 709 – 713.
2. *Hulse R.A., Taylor J.H.* Discovery of a pulsar in a binary system // *Astrophysical Journal*. — 1975. — Vol. 195. — Pp. 51 – 53.
3. *Backer D.C., Kulkarni S.R., Heiles C. et al.* A millisecond pulsar // *Nature*. — 1982. — Vol. 300, no. 5893. — Pp. 615 – 618.
4. *Hessels Jason W.T., Ransom Scott M., Stairs Ingrid H. et al.* A Radio Pulsar Spinning at 716 Hz // *Science*. — 2006. — Vol. 311, no. 5769. — Pp. 1901–1904.
5. *Kopeikin S. M., Potapov V. A.* Millisecond and binary pulsars as nature’s frequency standards - III. Fourier analysis and spectral sensitivity of timing observations to low-frequency noise // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2004. — Vol. 355, no. 2. — Pp. 395–412.
6. *Lyne A.G., Brinklow A., Middleditch J. et al.* The discovery of a millisecond pulsar in the globular cluster M28 // *Nature*. — 1987. — Vol. 328, no. 6129. — Pp. 399–401.
7. *Freire P.* Pulsars in globular clusters. — 2025. — URL: <https://prao.ru>.
8. *Wolszczan A., Frail D.A.* A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257 + 12 // *Nature*. — 1992. — Vol. 355, no. 6356. — Pp. 145–147.
9. *Backer D.C., Foster R.S., Sallmen S.* A second companion of the millisecond pulsar 1620 - 26 // *Nature*. — 1993. — Vol. 365, no. 6449. — Pp. 817–819.
10. *Thorsett S.E., Arzoumanian Z., Taylor J.H.* PSR B1620-26: A Binary Radio Pulsar with a Planetary Companion? // *Astrophysical Journal*. — 1993. — Vol. 412. — P. L33.
11. *Burgay M., D’Amico N., Possenti A. et al.* An increased estimate of the merger rate of double neutron stars from observations of a highly relativistic system // *Nature*. — 2003. — Vol. 426, no. 6966. — Pp. 531–533.

12. *Lyne A.G., Burgay M., Kramer M. et al.* A Double-Pulsar System: A Rare Laboratory for Relativistic Gravity and Plasma Physics // *Science*. — 2004. — Vol. 303, no. 5661. — Pp. 1153–1157.
13. *Shapiro Irwin I.* Fourth Test of General Relativity // *Physical Review Letters*. — 1964. — Vol. 13, no. 26. — Pp. 789–791.
14. *Machabeli G., Rogava A., Chkhidze N. et al.* The high energy emission of the Crab's twin pulsar PSR J0540-6919 in the Large Magellanic Cloud // *Astrophysics and Space Science*. — 2019. — Vol. 364, no. 4. — P. 71.
15. *McLaughlin M.A., Lyne A.G., Lorimer D.R. et al.* Transient radio bursts from rotating neutron stars // *Nature*. — 2006. — Vol. 439, no. 7078. — Pp. 817–820.
16. *Смит Ф.Г.* Пульсары. — Москва: Изд-во «Мир», 1979. — 290 с.
17. *Tedila H.M., Li D., Wang P. et al.* Unveiling the Emission Properties of Three Long-period Pulsars Using FAST // *Astrophysical Journal Supplement Series*. — 2025. — Vol. 277, no. 2. — P. 39.
18. *Попов М.В., Согласнов В.А., Кондратьев В.И. et al.* Результаты трехчастотного патрулирования гигантских импульсов от пульсара в Крабовидной туманности // *Астрономический Журнал*. — 2008. — Т. 85, № 11. — С. 999–1010.
19. *Малов И.Ф.* О гигантских импульсах радиопульсаров // *Астрономический Журнал*. — 2022. — Т. 99. — С. 15–28.
20. *Сулейманова С.А.* Поляризация радиоизлучения пульсаров на метровых волнах. — 2003. — URL: <https://www.prao.ru>.
21. *Molkov S., Doroshenko V., Lutovinov A. et al.* Discovery of the 5 keV Cyclotron Line Followed by Three Harmonics in Swift J1626.6-5156 // *Astrophysical journal letters*. — 2021. — Vol. 915, no. 2. — Pp. 27–31.
22. *Хьюиш А., Лайн А., Смит Ф. и др.* Пульсары. Сборник статей под редакцией Виткевича В.В. — Москва: Изд-во «Мир», 1971. — 270 с.
23. *Алексеев Ю. И., Виткевич В. В., Журавлев В. Ф. и др.* Новый пульсар PP 0943 // *Успехи физических наук*. — 1969. — Т. 99. — С. 523–524.

24. *Yusifov I., Kucuk I.* Revisiting the radial distribution of pulsars in the Galaxy // *Astronomy and Astrophysics*. — 2004. — Vol. 422. — Pp. 545 – 553.
25. *Manchester R.N., Hobbs G.B., Teoh A. et al.* The ATNF pulsar catalogue // *Astronomical Journal*. — 2005. — Vol. 129, no. 4. — Pp. 1993 – 2006.
26. *Abdo A.A., Ackermann M., Ajello M. et al.* Detection of 16 Gamma-Ray Pulsars Through Blind Frequency Searches Using the Fermi LAT // *Science*. — 2009. — Vol. 325, no. 5942. — P. 840.
27. *Marelli M., De Luca A., Salvetti D. et al.* PSR J0357+3205: The Tail of the Turtle // *Astrophysical Journal*. — 2013. — Vol. 765, no. 1. — P. 36.
28. *Wang P.* — FPS7, China, Guangzhou: 2018. — URL: http://www.phy.pku.edu.cn/~FPS/FPS7/FPS7_PPT/PeiWang.pdf.
29. *Шушов В. И., Чашей И.В., Орешко В. В. и др.* Мониторинг турбулентного солнечного ветра на модернизированном радиотелескопе БСА ФИАН: первые результаты // *Астрономический журнал*. — 2016. — Т. 93, № 12. — С. 1045–1060.
30. *Логвиненко С.В.* Система регистрации сигналов многолучевого радиотелескопа БСА ПРАО АКЦ ФИАН // *Приборы и техника эксперимента*. — 2023. — С. 1–11.
31. *Barr E.D., Champion D.J., Kramer M. et al.* The Northern High Time Resolution Universe pulsar survey - I. Setup and initial discoveries // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2013. — Vol. 435, no. 3. — Pp. 2234–2245.
32. *Keith M.J., Jameson A., van Straten W. et al.* The High Time Resolution Universe Pulsar Survey - I. System configuration and initial discoveries // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2010. — Vol. 409, no. 2. — Pp. 619–627.
33. *Boyles J., Lynch R.S., Ransom S.M. et al.* The Green Bank Telescope 350 MHz Drift-scan survey. I. Survey Observations and the Discovery of 13 Pulsars // *Astrophysical journal*. — 2013. — Vol. 763, no. 2. — P. 80.

34. *Deneva J.S., Stovall K., McLaughlin M.A. et al.* Goals, Strategies and First Discoveries of AO327, the Arecibo All-sky 327 MHz Drift Pulsar Survey // *Astrophysical journal*. — 2013. — Vol. 775, no. 1. — P. 51.
35. *Coenen T.* Searching for pulsars with LOFAR: Ph.D. thesis / University of Amsterdam, Anton Pannekoek Institute for Astronomy. — 2013.
36. *Тюльбашев С.А., Тюльбашев В.С., Орешко В.В. и др.* Обнаружение новых пульсаров на частоте 111 МГц // *Астрономический журнал*. — 2016. — Т. 93, № 2. — С. 177–190.
37. *Тюльбашев С.А., Тюльбашев В.С., Китаева М.А. и др.* Поиск и обнаружение пульсаров в мониторинговых наблюдениях на частоте 111 МГц // *Астрономический журнал*. — 2017. — Т. 94, № 10. — С. 837–848.
38. *Camilo F., Nice D.J., Shrauner J.A. et al.* Princeton-Arecibo Declination-Strip Survey for Millisecond Pulsars. I. // *Astrophysical journal*. — 1996. — Vol. 469. — P. 819.
39. *Тюльбашев С.А., Китаева М. А., Тюльбашев В. С. и др.* Обнаружение пяти новых пульсаров на радиотелескопе БСА ФИАН // *Астрономический журнал*. — 2020. — Т. 64, № 6. — С. 526–532.
40. *Sanidas S., Cooper S., Bassa C.G. et.al.* The LOFAR Tied-Array All-Sky Survey (LOTAAS): Survey overview and initial pulsar discoveries // *Astronomy and Astrophysics*. — 2019. — Vol. 626. — P. A104.
41. *Tyul'bashev S. A., Kitaeva M. A., Tyul'basheva G. E.* Pushchino multibeam pulsar search - I. Targeted search of weak pulsars // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2022. — Vol. 517, no. 1. — Pp. 1112–1125.
42. *Tan C.M., Bassa C.G., Cooper S.et.al.* The LOFAR Tied-Array all-sky survey: Timing of 21 pulsars including the first binary pulsar discovered with LOFAR // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2020. — Vol. 492, no. 4. — Pp. 5878–5896.
43. *Cameron A.D., Barr E.D., Champion D.J. et.al.* An investigation of pulsar searching techniques with the fast folding algorithm // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2017. — Vol. 468, no. 2. — Pp. 1994–2010.

44. *Parent E., Kaspi V.M., Ransom S.M. et.al.* The Implementation of a Fast-folding Pipeline for Long-period Pulsar Searching in the PALFA Survey // *Astrophysical Journal*. — 2018. — Vol. 861, no. 1. — P. 44.
45. *Morello V., Barr E.D., Stappers B.W. et.al.* Optimal periodicity searching: revisiting the fast folding algorithm for large-scale pulsar surveys // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2020. — Vol. 497, no. 4. — Pp. 4654–4671.
46. *Lorimer D.R., Kramer M.* Handbook of Pulsar Astronomy. — 2004. — Vol. 4.
47. *Kuz'min A.D., Losovskii B. Ya., Lapaev K.A.* Измерения рассеяния радиоизлучения пульсаров // *Астрономический журнал*. — 2007. — Т. 51, № 8. — С. 615–623.
48. *Bhat N. D. R., Cordes J. M., Camilo F. et.al.* The Implementation of a Fast-folding Pipeline for Long-period Pulsar Searching in the PALFA Survey // *Astrophysical Journal*. — 2004. — Vol. 605, no. 2. — Pp. 759–783.
49. *Geyer M., Karastergiou A., Kondratiev V.I. et.al.* Scattering analysis of LO-FAR pulsar observations // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2017. — Vol. 470, no. 3. — Pp. 2659–2679.
50. *Han J.L., Wang Chen et.al.* The FAST Galactic Plane Pulsar Snapshot survey: I. Project design and pulsar discoveries // *Research in Astronomy and Astrophysics*. — 2021. — Vol. 21, no. 5. — P. 107.
51. *Manchester R.N., Lyne A.G., D'Amico N. et.al.* The Parkes Southern Pulsar Survey. I. Observing and data analysis systems and initial results. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 1996. — Vol. 279, no. 4. — Pp. 1235–1250.
52. *Yao J.M., Manchester R.N., Wang N.* A New Electron-density Model for Estimation of Pulsar and FRB Distances // *Astrophysical Journal*. — 2017. — Vol. 835, no. 1. — P. 29.
53. *Tyul'bashev S.A., Tyul'bashev V.S., Malofeev V.M.* Detection of 25 new rotating radio transients at 111 MHz // *Astronomy and Astrophysics*. — 2018. — Vol. 618. — P. A70.

54. *Malofeev V.M.* Pulsar Radio Spectra // Pulsars: Problems and Progress. IAU Colloq. 160. — Vol. 105. — 1996. — P. 271.
55. *Bilous A.V., Kondratiev V.I., Kramer M. et.al.* A LOFAR census of non-recycled pulsars: average profiles, dispersion measures, flux densities, and spectra // *Astronomy and Astrophysics*. — 2016. — Vol. 591. — P. A134.
56. *Turtle A.J., Baldwin J.E.* A survey of galactic radiation at 178 Mc/s // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 1962. — Vol. 124. — P. 459.
57. *Tyul'bashev S.A., Tyul'basheva G.E., Kitaeva M.A. et. al.* Pushchino multi-beams pulsar search IV. Detection of new pulsars at declinations $-9^\circ < \delta < +55^\circ$ // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2024. — Vol. 528, no. 2. — Pp. 2220 – 2231.
58. *Dong Fengqiu Adam, Crowter Kathryn, Meyers Bradley W. et.al.* The second set of pulsar discoveries by CHIME/FRB/Pulsar: 14 rotating radio transients and 7 pulsars // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2023. — Vol. 524, no. 4. — Pp. 5132–5147.
59. *Chandler A. M.* — PhD thesis, California Institute of Technology: 2003.
60. *Tyul'bashev S.A., Tyul'bashev V.S., Malofeev V.M. et.al.* Detection of Five New RRATs at 111 MHz // *Astronomy Reports*. — 2018. — Vol. 62, no. 1. — Pp. 63–71.
61. *Hessels J.W.T., Ransom S.M., Kaspi V.M. et.al.* The GBT350 Survey of the Northern Galactic Plane for Radio Pulsars and Transients // 40 Years of Pulsars: Millisecond Pulsars, Magnetars and More / Ed. by C. Bassa, Z. Wang, A. Cumming, V. M. Kaspi. — Vol. 983 of *American Institute of Physics Conference Series*. — AIP, 2008. — Pp. 613–615.
62. *Logvinenko S.V., Tyul'bashev S.A., Malofeev V.M.* Detection of Two New RRAT at the Frequency of 111 MHz // *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*. — 2020. — Vol. 47, no. 12. — Pp. 390–393.
63. *van Leeuwen J., Stappers B.W.* Finding pulsars with LOFAR // *Astronomy and Astrophysics*. — 2010. — Vol. 509. — P. A7.

64. Multifrequency flux density measurements of 280 pulsars / D.R. Lorimer, J.A. Yates, A.G. Lyne, D.M. Gould // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 1995. — Vol. 273, no. 2. — Pp. 411–421.
65. *Bates S.D., Lorimer D.R., Verbiest J.P.W.* The pulsar spectral index distribution // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2013. — Vol. 431, no. 2. — Pp. 1352–1358.
66. *Tyulbashev S.A., Tyulbasheva G.E.* Search for Pulsars in an Area with Coordinates $3^h < \alpha < 4^h$ and $+21^\circ < \delta < +42^\circ$ // *Astronomy Reports*. — 2023. — Vol. 67, no. 2. — Pp. 172–180.
67. *Young N.J., Weltevrede P., Stappers B.W. et.al.* On the apparent nulls and extreme variability of PSR J1107-5907 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2014. — Vol. 442, no. 3. — Pp. 2519–2533.
68. Pushchino multibeam pulsar search - II. Long-term variability of rotating radio transients / T.V. Smirnova, S.A. Tyul'bashev, E.A. Brylyakova, M.A. et. al. Kitaeva // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2022. — Vol. 517, no. 1. — Pp. 1126–1137.
69. *Tyulbashev S.A., Tyulbashev V.S., Malofeev V.M.* Detection of 25 new rotating radio transients at 111 MHz // *Astronomy and Astrophysics*. — 2018. — Vol. 618. — P. A70.
70. *Deneva J.S., Cordes J.M., McLaughlin M.A. et.al.* Arecibo Pulsar Survey Using ALFA: Probing Radio Pulsar Intermittency And Transients // *Astrophysical Journal*. — 2009. — Vol. 703, no. 2. — Pp. 2259–2274.
71. *Singh S., Roy J., Panda U. et.al.* The GMRT High Resolution Southern Sky Survey for Pulsars and Transients. III. Searching for Long-period Pulsars // *Astrophysical Journal*. — 2022. — Vol. 934, no. 2. — P. 138.
72. *Vasseur J., Paul J., Parlier B. et.al.* Possible Pulsed Gamma Ray Emission above 50 MeV from the Crab Pulsar // *Nature*. — 1970. — Vol. 226, no. 5245. — Pp. 534–535.
73. *Тюльбашев С.А., Китаева М. А.* Поиск периодического радиоизлучения гамма пульсара J0357+3205 в индивидуальных записях на частоте 111

- МГц // *Краткие сообщения по физике Физического института им. П.Н. Лебедева Российской Академии Наук.* — 2019. — № 7. — С. 21–25.
74. *Tyulbashev S.A., M.A. Kitaeva, Tyulbasheva G.E.* Search for Periodic Radio Emission in a Few Gamma-Ray Pulsars at 111 MHz // *Proceedings of the All-Russian Conference, 2020 / SAO RAS.* – Nizhny Arkhyz, Russia. — 2020. — Pp. 474–476.
75. *Тюльбашев С.А., Китаева М.А., Тюльбашева Г.Э.* Поиск периодического излучения у пяти гамма-пульсаров на частоте 111 МГц // *Астрономический журнал.* — 2021. — Т. 98, № 10. — С. 849–855.
76. *Pletsch H.J., Guillemot L., Allen B. et.al.* Einstein@Home Discovery of Four Young Gamma-Ray Pulsars in Fermi LAT Data // *Astrophysical Journal.* — 2013. — Vol. 779. — P. L11.
77. *Saz Parkinson P.M., Dormody M., Ziegler M. et.al.* Eight gamma-ray Pulsars Discovered in Blind Frequency Searches of Fermi LAT Data // *Astrophysical Journal.* — 2010. — Vol. 725, no. 1. — Pp. 571–584.
78. *Kirichenko A., Danilenko A., Shibanov Yu. et.al.* Deep optical observations of the gamma-ray pulsar J0357+3205 // *Astronomy and Astrophysics.* — 2014. — Vol. 564. — P. A81.
79. *Aleksic J., Antonelli L.A., Antoranz P.et.al.* MAGIC Upper Limits for Two Milagro-detected Bright Fermi Sources in the Region of SNR G65.1+0.6 // *Astrophysical Journal.* — 2010. — Vol. 725, no. 2. — Pp. 1629–1632.
80. *Hui C.Y., Seo K.A., Lin L.C.C. et.al.* A Detailed X-Ray Investigation of PSR J2021+4026 and the gamma-Cygni Supernova Remnant // *Astrophysical Journal.* — 2015. — Vol. 799, no. 1. — P. 76.
81. *Mignani R.P., Testa V., Rea N. et.al.* Observations of one young and three middle-aged gamma-ray pulsars with the Gran Telescopio Canarias // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* — 2018. — Vol. 478, no. 1. — Pp. 332–341.
82. *Drake F.D., Craft H.D.* Second Periodic Pulsation in Pulsars // *Nature.* — 1968. — Vol. 220, no. 5164. — Pp. 231–235.

83. *Weltevrede P., Edwards R.T., Stappers B.W.* The subpulse modulation properties of pulsars at 21 cm // *Astronomy and Astrophysics*. — 2006. — Vol. 445, no. 1. — Pp. 243–272.
84. *Song X., Weltevrede P., Szary A. et.al.* The Thousand-Pulsar-Array programme on MeerKAT - VIII. The subpulse modulation of 1198 pulsars // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2023. — Vol. 520, no. 3. — Pp. 4562–4581.
85. *Janssen G.H., van Leeuwen J.* Intermittent nulls in PSR B0818-13, and the subpulse-drift alias mode // *Astronomy and Astrophysics*. — 2004. — Vol. 425. — Pp. 255–261.
86. *Huguenin G.R., Taylor J.H., Troland T.H.* The Radio Emission from Pulsar MP 0031-07 // *Astrophysical Journal*. — 1970. — Vol. 162. — P. 727.
87. *Izvekova V.A., Kuzmin A.D., Shitov Y.P.* Discovery of Regular Drift Anomalous in Direction of Subpulses of Pulsar PSR0320+39 // *Astronomicheskii Zhurnal*. — 1982. — T. 59. — C. 536–542.
88. *Ruderman M.A., Sutherland P.G.* Theory of pulsars: polar gaps, sparks, and coherent microwave radiation. // *Astrophysical Journal*. — 1975. — Vol. 196. — Pp. 51–72.
89. *Gil J., Melikidze G.I., Geppert U.* Drifting subpulses and inner acceleration regions in radio pulsars // *Astronomy and Astrophysics*. — 2003. — Vol. 407. — Pp. 315–324.
90. *Qiao G.J., Lee K.J., Zhang B. et.al.* A Model for the Challenging Bi-drifting Phenomenon in PSR J0815+09 // *Astrophysical Journal*. — 2004. — Vol. 616, no. 2. — Pp. L127–L130.
91. *Deshpande Avinash A., Rankin Joanna M.* The topology and polarization of sub-beams associated with the ‘drifting’ sub-pulse emission of pulsar B0943+10 - I. Analysis of Arecibo 430- and 111-MHz observations // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2001. — Vol. 322, no. 3. — Pp. 438–460.
92. Unraveling the drift behaviour of the remarkable pulsar PSR B0826-34 / Y. Gupta, J. Gil, J. Kijak, M. Sendyk // *Astronomy and Astrophysics*. — 2004. — Vol. 426. — Pp. 229–245.

93. *Edwards R. T., Stappers B. W.* Drifting sub-pulse analysis using the two-dimensional Fourier transform // *Astronomy and Astrophysics*. — 2002. — Vol. 393. — Pp. 733–748.
94. *Edwards R. T., Stappers B. W.* The frequency-dependence of drifting subpulse patterns // *Astronomy and Astrophysics*. — 2003. — Vol. 410. — Pp. 961–966.
95. *Malofeev Valery M., Tyulbashev Sergey A.* Investigation of radio pulsar emission features using power spectra // *Research in Astronomy and Astrophysics*. — 2018. — Vol. 18, no. 8. — P. 096.
96. *Smirnova T.V., Tyul'bashev S.A., Kitaeva M.A. et al.* Pushchino multibeam pulsar search - III. Drift periods of pulsars from summed power spectra method // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2024. — Vol. 528, no. 1. — Pp. 726–734.
97. *Wang N., Manchester R.N., Johnston S.* Pulsar nulling and mode changing // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2007. — Vol. 377, no. 3. — Pp. 1383–1392.
98. *Backer D.C.* Correlation of Subpulse Structure in a Sequence of Pulses from Pulsar PSR 1919+21 // *Nature*. — 1970. — Vol. 227, no. 5259. — Pp. 692–695.
99. *Toropov M.O., Tyul'bashev S.A., Smirnova T.V. et.al.* Study of the variability and components of the pulsar B0823+26 at a frequency of 111 MHz // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2024. — Vol. 527, no. 1. — Pp. 1594–1600.
100. *McLaughlin M.A., Lyne A.G., Keane E.F. et.al.* Timing observations of rotating radio transients // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2009. — Vol. 400, no. 3. — Pp. 1431–1438.
101. *Keane E.F., McLaughlin M.A.* Rotating radio transients // *Bulletin of the Astronomical Society of India*. — 2011. — Vol. 39, no. 3. — Pp. 333–352.
102. *Popov S.B., Turolla R., Possenti A.* A tale of two populations: rotating radio transients and X-ray dim isolated neutron stars // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2006. — Vol. 369, no. 1. — Pp. L23–L26.

103. *Burke-Spolaor S., Bailes M.* The millisecond radio sky: transients from a blind single-pulse search // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2010. — Vol. 402, no. 2. — Pp. 855–866.
104. *Meyers B.W., Tremblay S.E., Bhat N.D.R. et al.* The emission and scintillation properties of RRAT J2325-0530 at 154 MHz and 1.4 GHz // *Publications of the Astronomical Society of Australia*. — 2019. — Vol. 36. — P. e034.
105. *Keane E.F., Kramer M.* On the birthrates of Galactic neutron stars // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2008. — Vol. 391, no. 4. — Pp. 2009–2016.
106. *Тюльбашев С.А., Китаева М.А., Логвиненко С.В. et al.* Поиск диспергированных импульсов на склонениях от $+56^\circ$ до $+87^\circ$ // *Астрономический журнал*. — 2021. — Т. 98, № 12. — С. 1010–1018.
107. *Dagkesamanskii R.D., Samodurov V.A., Lapaev K.A.* A sky survey at 102.5 MHz: Radio sources at declinations 27.5° 33.5° and 67.5° 70.5° // *Astronomy Reports*. — 2000. — Vol. 44, no. 1. — Pp. 18–25.
108. *Тюльбашев С.А., Голышева П.Ю., Тюльбашев В.С. et al.* Поиск долговременной переменности в нескольких источниках с плоскими спектрами по наблюдениям на 111 МГц // *Астрономический Журнал*. — 2019. — Т. 96, № 11. — С. 927–938.
109. *Malofeev V.M., Malov O.I., Shchegoleva N.V.* Flux Densities of 235 Pulsars at 102.5 MHz // *Astronomy Reports*. — 2000. — Vol. 44, no. 7. — Pp. 436–445.
110. *Stovall K., Lynch R.S., Ransom S.M. et al.* The Green Bank Northern Celestial Cap Pulsar Survey. I. Survey Description, Data Analysis, and Initial Results // *Astrophysical Journal*. — 2014. — Vol. 791, no. 1. — P. 67.
111. *Kazantsev A.N., Potapov V.A.* Search for giant pulses of radio pulsars at frequency 111 MHz with LPA radio telescope // *Research in Astronomy and Astrophysics*. — 2018. — Vol. 18, no. 8. — P. 097.
112. *Тюльбашев С.А., Тюльбашев В.С., Малофеев В.М. и др.* Обнаружение пяти новых источников типа RRAT на частоте 111 МГц // *Астрономический журнал*. — 2018. — Т. 62, № 1. — С. 63–71.

113. *Исаев Е.А., Самодуров В.А., Первухин Д.В. и др.* Применение сверточных нейронных сетей (CNN) для поиска паттернов в рядах данных различной природы // *Промышленные АСУ и контроллеры*. — 2019. — № 12. — С. 24–32.
114. *Tyul'bashev S.A., Pervukhin D.V., Kitaeva M.A. et al.* Revisiting the Pushchino RRAT search using a neural network // *Astronomy and Astrophysics*. — 2022. — Vol. 664. — P. A37.
115. *Purvis A., Tappin S.J., Rees W.G. et al.* The Cambridge IPS survey at 81.5 MHz. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 1987. — Vol. 229. — Pp. 589–619.
116. *Zeissig G.A., Lovelace R.V.E.* Interplanetary Scintillation, Interstellar Scattering of Two Pulsars // *Astronomy and Astrophysics*. — 1972. — Vol. 16. — P. 190.
117. *Marians M.* Computed scintillation spectra for strong turbulence // *Radio Science*. — 1975. — Vol. 10. — Pp. 115–119.
118. *Prokhorov A., Shteynshleyger B.* Radio bridges through the universe // *Modern Achievements of Cosmonautics* / Ed. by B. Petrov, A. Koval, K. et al. Bushuyev. — 1975. — Pp. 63–67.
119. *Brylyakova E.A., Tyul'bashev S.A.* Pulse energy distribution for RRAT J0139+33 according to observations at the 111 MHz frequency // *Astronomy and Astrophysics*. — 2021. — Vol. 647. — P. A191.
120. *Mickaliger M.B., McEwen A.E., McLaughlin M.A. et al.* A study of single pulses in the Parkes Multibeam Pulsar Survey // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2018. — Vol. 479, no. 4. — Pp. 5413–5422.
121. *Tyul'bashev S.A., Chashei I.V., Kitaeva M.A.* Interplanetary scintillation and pulsar pulse statistics // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2023. — Vol. 523, no. 1. — Pp. 1389–1393.

Приложение А

Пульсары, отмеченные на Рис. 1.15

Пульсары, обнаруженные в нашем обзоре и не обнаруженные в LOOTAS: J0146+31, J0220+36, J0509+37, J0933+32, J1242+39, J1832+27, J1843+21, J1844+41, J1921+34, J1958+22, J2008+27, J2030+34

Пульсары, обнаруженные и в нашем обзоре, и в LOOTAS: J0035+35, J0139+33, J0302+22, J0349+23, J0421+32, J0811+37, J0813+22, J0857+33, J0928+30, J0935+33, J1303+38, J1529+40, J1635+23, J1638+40, J1657+33, J1658+36, J1707+35, J1722+35, J1741+38, J1740+27, J1814+22, J1849+25, J1953+30, J2006+22, J2022+21, J2057+21, J2122+24, J2123+36, J2209+22, J2306+31, J2350+31

Пульсары, обнаруженные в LOOTAS и не обнаруженные нами: J1916+32

Приложение Б

Список пульсаров, обнаруженных в слепом поиске.

Список известных ATNF пульсаров, обнаруженных в слепом поиске. В списке 287 пульсаров. 184 пульсара обнаруживались нами ранее как объекты регулярного излучения или по отдельным импульсам, и 103 известных пульсара детектированы в проведенном обзоре (выделены жирным шрифтом). Карты, доказывающие обнаружение пульсаров, можно найти на сайте <https://bsa-analytics.prao.ru/en/pulsars/known/>

J0006+1834, **J0014+4746**, J0034-0721, J0039+35, J0048+3412, J0051+0423, **J0055+5117**, **J0056+4756**, **J0058+4950**, J0109+11, J0122+1416, J0137+1654, J0146+31, J0158+21, **J0212+5222**, J0220+3626, **J0229+20**, **J0241+16**, J0244+14, J0302+2252, J0304+1932, J0305+11, J0317+13, J0323+3944, J0332+5434, **J0335+4555**, **J0343+5312**, J0349+2340, **J0355+28**, J0358+4155, **J0358+5413**, **J0408+551**, J0417+35, J0421+3255, J0435+2749, **J0454+4529**, **J0454+5543**, J0457+23, J0517+2212, **J0518+5416**, J0525+1115, J0528+2200, J0534+2200, **J0538+2817**, J0540+3207, J0543+2329, J0546+2441, J0555+3948, **J0601-0527**, **J0608+00**, J0608+1635, **J0609+2130**, **J0611+1436**, J0611+30, J0612+37216, J0612+3721, J0613+3731, J0614+2229, **J0621+0336**, J0623+0340, **J0624-0424**, J0629+2415, J0659+1414, **J0742+4334**, J0754+3231, **J0811+37**, J0813+22, **J0815+0939**, **J0815+4611**, J0823+0159, J0826+2637, J0837+0610, J0857+3349, J0922+0638, J0928+30, **J0935+33**, J0943+1631, J0943+2253, J0944+4106, J0946+0951, J0947+2740, J0953+0755, **J1000+08**, J1017+3011, **J1115+5030**, J1132+25, J1136+1551, J1239+2453, J1238+2152, J1239+2453, J1242+39, J1246+2253, J1303+38, J1313+0931, J1326+33, J1404+1159, **J1426+52**, J1509+5531, **J1518+4904**, J1529+40, J1532+2745, J1536+17, J1538+2345, J1543-0620, J1543+0929, J1549+2113, J1555+01, J1607-0032, **J1612+2008**, J1614+0737, J1627+1419, **J1628+4406**, J1635+2418, **J1635+2332**, **J1638+4005**, **J1643+1338**, J1645-0317, J1645+1012, J1649+2533, J1652+2651, J1657+3304, J1707+35, J1722+35, J1720+2150, J1728-0007, **J1735-0243**, J1735-0724, J1740+1311, J1740+27, J1741+2758, J1741+3855, J1745+1252, **J1745+42**, J1746+2540, J1746+2245, J1752+2359,

J1758+3030, J1800+5034, J1801-0357, J1810+0705, J1813+4013,
J1814+1130, J1814+22, J1819+1305, J1820-0427, J1821+1715, J1821+4147,
J1823+0550, J1825-0935, J1832+27, J1834-0426, J1836+51, J1838+1650,
J1841+0912, J1844+1454, J1844+41, J1848+0647, J1849+0409, J1849+2423,
J1849+2559, J1850+1335, J1851+1259, J1854+36, J1900+30, J1901+0156,
J1904+33, J1906+1854, J1907+4002, J1909+0254, J1909+0007, J1909+1102,
J1909+1859, J1910-0556, J1910+0358, J1912+2525, J1913-0440, J1913+3732,
J1915+1647, J1916+0951, J1916+3224, J1917+1353, J1917+17, J1917+2224,
J1919+0021, J1920+2650, J1921+1419, J1921+1948, J1921+2153, J1922+2110,
J1923+4243, J1926+0431, J1928+28, J1929+00, J1929+1844, J1929+3817,
J1931-0144, J1932+1059, J1933+2421, J1934+5219, J1935+1616, J1937+2544,
J1938+14, J1938+0650, J1941+0121, J1941+4320, J1943+0609,
J1945+07, J1946+1805, J1948+3540, J1950+3001, J1952+1410, J1952+3252,
J1953+30, J1954+2923, J1954+3852, J1954+4357, J1955+5059,
J2000+2920, J2001+4258, J2006-0807, J2006+22, J2007+0809, J2007+0910,
J2008+2513, J2008+2755g, J2010+2845, J2016+1948, J2017+2043,
J2018+2839, J2022+21, J2022+2854, J2022+5154, J2023+5037, J2029+3744,
J2030+2228, J2030+55, J2036+2835, J2037+1942, J2040+1657, J2043+2740,
J2045+0912, J2046+1540, J2046-0421, J2051+1248, J2053+1718, J2055+2209,
J2057+21, J2102+38, J2105+19, J2105+28, J2108+4441, J2108+4516,
J2113+2754, J2113+4644, J2116+1414, J2122+2426, J2123+36, J2124+1407,
J2139+2242, J2157+4017, J2155+2813, J2203+50, J2205+1444, J2208+4056,
J2208+5500, J2209+22, J2212+2933, J2215+1538, J2215+4524, J2227+3038,
J2234+2114, J2235+1506, J2253+12, J2253+1516, J2305+3100, J2306+31,
J2317+2149, J2219+4754, J2305+4707, J2313+4253, J2333+20, J2336-01,
J2338+4818, J2340+08, J2347+02, J2350+31, J2355+2246

Приложение В

Список не обнаруженных нами пульсаров

ATNF пульсары, которые не детектированы в нашем обзоре в площадке $+21^\circ < \delta < +42^\circ$ с периодами $P > 0.5$ с и мерами дисперсии $DM < 200$ пк/см³)

J0414+31, J0658+2936, J0927+2345, J1629+33, J1822+2617, J1829+25,
J1912+2104, J1919+2621, J1929+2121, J1931+30, J2011+3006g, J2015+2524,
J2017+2819g, J2037+3621, J2044+28, J2111+2106, J2129+4119, J2145+21,
J2151+2315, J2307+2225

Приложение Г

Список исследуемых пульсаров

Список 41 исследованного пульсара с периодами $P_1 > 200$ мс, которые были выбраны для поиска дрейфа:

J0034-0721; J0048+3412; J0051+0423; J0146+31; J0220+3626; J0304+1932;
J0528+2200; J0608+1635; J0629+2415; J0659+1414; J0837+0610; J0922+0638;
J0946+0951; J0953+0755; J1238+2152; J1242+39; J1313+0931; J1404+1159;
J1543+0929; J1543-0620; J1614+0737; J1627+1419; J1645-0317; J1645+1012;
J1721+3524; J1740+1311; J1821+4147; J1823+0550; J1844+1454; J1920+2650;
J1931-0144; J1932+1059; J1946+1805; J1952+1410; J2007+0910; J2046+1540;
J2116+1414; J2212+2933; J2215+1538; J2219+4754; J2253+1516.