

*РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. П.Н. ЛЕБЕДЕВА*

На правах рукописи

Теплых Дарья Андреевна

**ПОИСК И ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ОТ
АНОМАЛЬНЫХ ПУЛЬСАРОВ НА НИЗКИХ ЧАСТОТАХ**

01.03.02 – астрофизика и звёздная астрономия

*Диссертация на соискание
учёной степени кандидата
физико-математических наук*

*Научный руководитель:
доктор физико-математических наук
В.М. Малофеев*

Москва

2011

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ		4
ГЛАВА I.	Наблюдательная база	24
	§ 1.1. Радиотелескопы ПРАО АКЦ ФИАН	24
	§ 1.2. Приёмная аппаратура	30
	§ 1.3. Методика наблюдений и обработки	33
ГЛАВА II.	Аномальные рентгеновские пульсары	47
	§ 2.1. Обнаружение АХР в радиодиапазоне	47
	§ 2.2. Наблюдения АХР 1E 2259+586	51
	§ 2.3. Наблюдения АХР 4U 0142+61	65
	§ 2.4. Наблюдения АХР XTE J1810-197	76
	Выводы к Главе II	81

ГЛАВА III. Одиночные нейтронные звезды со слабым рентгеновским излучением (XDINS) и радиотрензиенты (RRAT).	83
§ 3.1. Наблюдения XDINS J1308+21	84
§ 3.2. Наблюдения XDINS J2143+06	92
§ 3.3. Радиотранзиенты.	
Наблюдения RRAT J1819-14	100
Выводы к Главе III	106
 ЗАКЛЮЧЕНИЕ	 107
 ЛИТЕРАТУРА	 109

Введение

Нейтронные звезды, предсказанные еще в начале прошлого столетия (Baade & Zwicky, 1939), были обнаружены спустя тридцать лет, в 1967 г., совершенно случайно, как радиопульсары (Hewish et al., 1968). И это открытие является одним из выдающихся достижений современной астрономии. Необычные свойства этих космических объектов сразу же привлекли пристальное внимание многих астрономов и физиков, как наблюдателей, так и теоретиков. С астрофизической точки зрения нейтронные звезды интересны как заключительный этап звездной эволюции. Как источники импульсного периодического поляризованного излучения, пульсары являются хорошим средством для исследования межзвездной среды. С точки зрения физики нейтронные звезды предоставляют уникальную возможность для изучения вещества в экстремальных состояниях. Для них характерны такие явления и свойства, как сверхтекучесть, сверхпроводимость, сверхсильные магнитные поля, излучение нейтрино, эффекты специальной и общей теории относительности. В недрах нейтронных звезд могут существовать экзотические формы материи (конденсаты различных элементарных частиц, кварковое вещество).

К моменту открытия пульсаров для исследования их излучения имелись крупные чувствительные радиотелескопы, а радиоастрономические и радиофизические методы, необходимые для наблюдения импульсных радиоисточников, уже были достаточно развиты. Это позволило в короткий срок открыть большое число новых объектов этого класса и начать исследовать их свойства. Последующие данные наблюдений в оптике, рентгеновском и гамма-диапазонах существенно дополнили знания об этих объектах.

Уже к середине 70-х годов было установлено, что наблюдаемое пульсирующее строго периодичное радиоизлучение связано с вращением нейтронной звезды (Gold, 1968). И источник энергии радиопульсаров

обусловлен энергией вращения, а механизм энерговыделения связан с их сверхсильным магнитным полем ($\sim 10^{12}$ Гс) (Pacini, 1967). Пульсары могут быть одиночными объектами, либо входить в состав двойных систем. Они излучают во всем частотном диапазоне, от радио до оптики и гамма-лучей. Также существуют нейтронные звезды, входящие в тесные двойные системы, где излучение происходит за счет аккреции вещества, истекающего из второго компаньона (рентгеновские пульсары). Кроме того, в таких системах обнаружены миллисекундные радиопульсары (Hulse & Taylor, 1975), которые были, по сути, предсказаны за год до этого (Бисноватый-Коган и Комберг, 1974).

На сегодняшний день известно более 1700 радиопульсаров, в том числе 125 радиопульсаров с миллисекундными периодами, приблизительно 200 аккреционных рентгеновских пульсаров, входящих в тесные двойные системы, и примерно 50 одиночных «радиотихих» нейтронных звезд. Эта группа «радиотихих» нейтронных звезд сформировалась, в основном, за последнее десятилетие и притягивает к себе все большее внимание (см., например, обзор Попов и Прохоров, 2003). В ее составе несколько типов источников:

- источники с повторяющимися мягкими гамма-всплесками (SGRs – Soft gamma repeaters);
- аномальные рентгеновские пульсары (AXPs – Anomalous X-ray pulsars);
- пульсары типа Геминги;
- центральные компактные объекты в остатках вспышек сверхновых (CCOs in SNRs – central compact objects in supernova remnants);
- одиночные нейтронные звезды со слабым рентгеновским излучением (XDINSs – X-ray dim isolated neutron stars) или «Великолепная семерка»;
- радиотранзиентные источники (RRATs – rotating radio transients) (RRAT были обнаружены в радиодиапазоне, но, тем не менее, эти объекты относят к классу «радиотихих» пульсаров, поскольку они отличаются

слабым и редко проявляющимся радиоизлучением, и кроме того, по своим свойствам близки к группе XDINS).

AXP и SGR также еще называют магнетарами (это модель нейтронной звезды со сверхсильным магнитным полем $\sim 10^{15}$ Гс). Эти объекты изначально были классифицированы как разные типы нейтронных звезд, но при более детальном и длительном рассмотрении оказалось, что они обладают похожими свойствами и поведением.

Источники мягких гамма-всплесков были открыты по обнаружению коротких вспышек в жестком рентгеновском и мягком гамма-диапазонах. Первая вспышка была обнаружена от SGR 1806-20 в январе 1979 г. (Mazerts & Golenetskii, 1981). Изначально она была классифицирована как подтип классических гамма-всплесков с более короткой длительностью и мягким спектром. Кроме того, вспышки от SGR – повторяющееся явление, чего не наблюдается у обычных гамма-всплесков.

5 марта 1979г. была зарегистрирована очень яркая вспышка ($L_x \sim 10^{45}$ эрг/с) от SGR 0526-66 в остатке сверхновой N49 в Большом Магелановом Облаке (Mazets et al., 1979). «Хвост» вспышки показал восьмисекундные пульсации. Высокая светимость, строгая периодичность и очевидная связь с остатком вспышки сверхновой – все это указывало на то, что источник является молодой нейтронной звездой с периодом вращения 8 секунд.

Всего на данный момент известно 7 SGR и 2 кандидата в эту группу (McGill SGR/AXP Online Catalog). Все источники были отождествлены в рентгеновском диапазоне. Периоды вращения этих объектов лежат в узком диапазоне, $P \sim 5\text{--}8$ сек. Некоторые из SGR связаны с остатками вспышек сверхновых. В настоящее время признаны три типа вспышек: слабые (наиболее многочисленные), промежуточные, гигантские и гипер-вспышки (пока была зарегистрирована только одна такая вспышка).

Близкие к SGR объекты – аномальные рентгеновские пульсары были открыты в мягком рентгеновском диапазоне (< 10 кэВ). Первое открытие АХР было сделано Фалманом и Грегори в 1981 г. (Fahlman & Gregory, 1981), которые обнаружили пульсации от рентгеновского источника 1E 2259+586 в центре остатка сверхновой СТВ 109. В течении последующих 15 лет было обнаружено еще несколько похожих пульсаров, и эти источники объединили в особую группу, первоначально как маломассивные двойные рентгеновские пульсары. Данные последующих наблюдений, в том числе в оптическом и ИК диапазонах, исключили наличие звезд-компаньонов и выявили их необычные свойства, что привело к выделению АХР в отдельный класс рентгеновских пульсаров (Hellier, 1994, Mereghetti & Stella, 1995). С 1996 года было открыто еще пять источников этого типа, итого на сегодняшний момент насчитывается 9 аномальных рентгеновских пульсаров и 3 кандидата в АХР.

Особенности этих объектов в следующем. Периоды вращения лежат почти в том же диапазоне, что и у SGR (~ 2 – 12 сек). Все источники расположены вблизи плоскости Галактики, некоторые связаны с остатками вспышек сверхновых. От обычных рентгеновских пульсаров их так же отличает наличие постоянного замедления периода вращения, достаточно стабильный рентгеновский поток и более мягкий рентгеновский спектр. Наиболее интригующей особенностью аномальных рентгеновских пульсаров до сих пор остается их высокая светимость, которая на несколько порядков превышает потери кинетической энергии вращения. Так же до недавнего времени в этом списке особенностей значилось отсутствие радиоизлучения.

На связь между АХР и SGR указывают их близкие значения периодов и производных периодов, а также некое сходство в поведении. В своем спокойном состоянии SGR демонстрируют похожие на АХР свойства. Например, у SGR 0526-66 не было обнаружено вспышечной активности с начала 80-х гг., и он ведет себя как типичный АХР. С другой стороны, АХР

могут производить вспышки, которые очень напоминают слабые вспышки от SGR. Например, от 1E 1048,1-5937 были зарегистрированы две слабые вспышки (Gavriil et al., 2002), и более 80 вспышек от 1E 2259+586 (Kaspi et al., 2002). И главное, для обоих типов пульсаров остается неясным источник энергии, т.к. ни вращательная, ни тепловая энергия не объясняет наблюдаемую активность ни в АХР, ни в SGR.

Следом за открытием нового типа источников было предложено большое количество различных моделей для объяснения природы этих объектов. Самой жизнестойкой и на сегодняшний день наиболее популярной моделью является модель магнетара, она же и объединила оба типа пульсаров. Модель магнетара наиболее хорошо описывала природу SGR и АХР, их спокойную фазу и вспышечную активность. При таких огромных магнитных полях ($\sim 10^{14} - 10^{15}$ Гс) будет весьма затруднительно образование электрон-позитронной плазмы (Baring & Harding, 1998), которая ответственна за излучение радиопульсаров. И отсутствие радиоизлучения было одним из основных аргументов в пользу модели магнетара. Однако в 1999-2001 г.г. было зарегистрировано импульсное излучение от SGR 1900+14 (Shitov et al., 2000) и АХР 1E 2259+586 (Malofeev & Malov, 2001, Малофеев и др., 2005). Этот факт в очередной раз заставил задуматься о природе этих объектов. Позднее было обнаружено радиоизлучение еще от трех аномальных рентгеновских пульсаров, ХТЕ J1810-197 (Camilo et al., 2006), 1E 1547-54 (Camilo et al., 2007a) и 4U 0142+61 (Теплых и др., 2008, Малофеев и др., 2010).

Несколько АХР были отождествлены в оптическом и ИК-диапазонах. У АХР 4U 0142+61 были обнаружены оптические пульсации с периодом равным рентгеновскому периоду (Kern & Martin, 2002). И недавнее открытие – остаточный диск у этого же объекта (Wang et al., 2006), что является подтверждением одной из альтернативных моделей. Еще один факт, добавляющий вопросов в понимание природы магнетаров, – это обнаружение

жесткого рентгеновского излучения (>10 кэВ) по наблюдениям на спутнике INTEGRAL от четырех AXP и двух SGR (Molkov et al., 2004, Revnivtsev et al., 2004, Kuiper et al., 2006).

Пульсар Геминга от большинства радиопульсаров отличается аномально крутым спектром и сильными флуктуациями в интенсивности излучения, в длительности импульсов и в фазе их прихода (Malofeev & Malov, 1997). Объект Геминга был обнаружен в 1975 г. спутником SAS — 2, как первый и самый яркий гамма-источник (Fichtel et al., 1975). В 1992 г. Геминга была отождествлена с нейтронной звездой с периодом 237 мс сначала в рентгеновском (Halpern & Holt, 1992), а затем и в гамма-диапазоне (Bertsch et al., 1992). Геминга — один из самых близких пульсаров, находящийся на расстоянии около 150 пк, также этот объект является одним из немногих «всеволновых» пульсаров. Излучение от этого объекта было зарегистрировано в УФ (Kargaltsev et al., 2005), ИК (Danilenko et al., 2011) и оптическом диапазонах (Shearer et al., 1998, Shibano et al., 2006). Импульсное радиоизлучение было обнаружено на низких частотах в диапазоне 39 — 102.5 МГц (Кузьмин и Лосовский, 1997, Malofeev & Malov, 1997, Shitov & Pugachev, 1998). С учетом верхних оценок потока, полученных на более высоких и низких частотах, установлено, что Геминга имеет самый крутой спектр среди радиопульсаров, - спектральный индекс в диапазоне 87 - 318 МГц равен - 4.5, а на частотах ниже 50 МГц наступает резкий завал (Malofeev & Malov, 2000). Обнаружены еще два объекта по своим свойствам похожих на Гемингу: 3EG J1835+5918 (Mirabal & Halpern, 2001 и Halpern et al., 2007) и J2021+4026 (Trepl et al., 2010).

Следующая группа одиночных рентгеновских нейтронных звезд — центральные компактные объекты в остатках вспышек сверхновых (ССО). ССО определяют как рентгеновские источники с тепловыми спектрами,

находящиеся близко к центру непериодических остатков вспышек сверхновых, и не имеющие аналогов в радио и гамма-диапазонах. К настоящему моменту известно примерно 10 источников этого типа и их число непрерывно увеличивается (см, например, Pavlov et al., 2004). В остатке сверхновой Kes 79 на частоте 111.23 МГц был обнаружен радиопульсар PSRJ1852+0040 с тем же периодом, что и в рентгене (Malofeev et al., 2005).

Все большее внимание притягивает к себе группа одиночных нейтронных звезд со слабым рентгеновским излучением (XDINS). Всего в этой группе насчитывается семь источников, и с 2001 года их число остается неизменным, отсюда и другое название этой группы – «Великолепная семерка» (Treves et al., 2000).

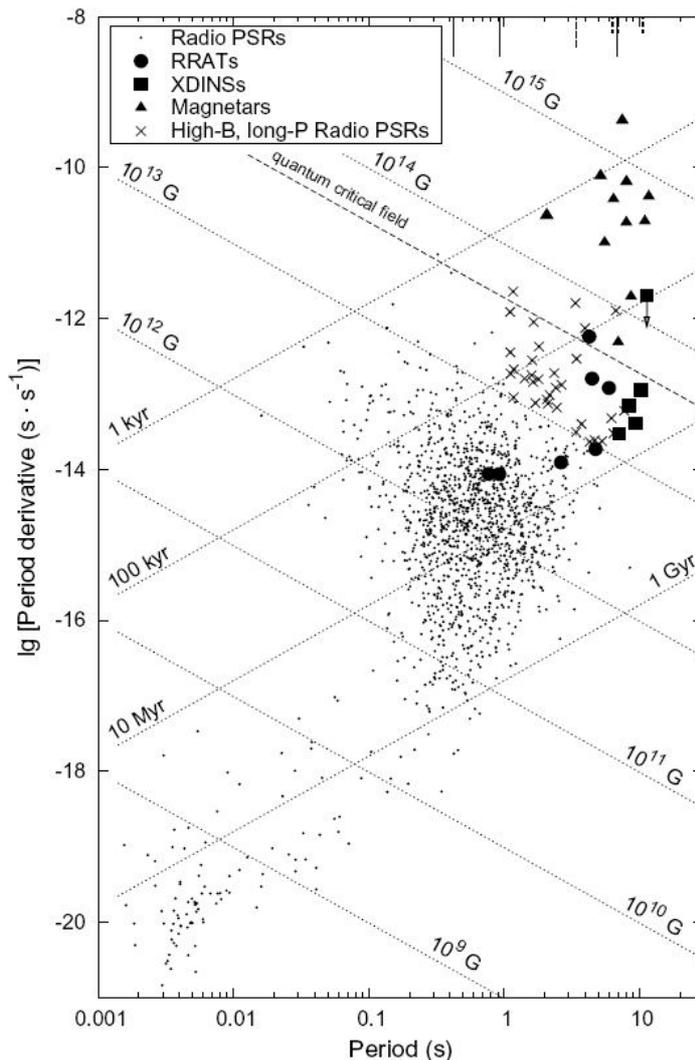


Рис. 1. Диаграмма $P - \dot{P}$ (из работы Kondratiev et al., 2009)

Все источники этой группы были открыты по наблюдениям рентгеновской обсерватории ROSAT. Первым стал наиболее сильный из всех объектов RX J1856-37, открытый в 1996 г. (Walter et al., 1996). Позднее было обнаружено 6 других похожих объектов. Все семь источников объединены в одну группу как радиотихие, близкие (сотни парсек) изолированные нейтронные звезды с тепловым излучением за счет остывания. Была подтверждена чернотельная форма их рентгеновского спектра, типичные температуры лежат в пределах 44 – 100 эВ. Для трех источников были измерены собственные движения, оказавшиеся очень большими. Ни один из источников не связан с известными остатками вспышек сверхновых, что автоматически ограничивает их характеристический возраст ($T \geq 10^5$ лет). У пяти нейтронных звезд из этой группы обнаружены рентгеновские пульсации с периодами в диапазоне 3 – 12 сек. Все члены «Великолепной семерки» отождествлены в оптическом диапазоне, их звездные величины слабее 24^m (Walter & Mathews, 1997, Motch & Haberl, 1998, Haberl et al., 2004, Kaplan et al., 2002, 2003a, Zane et al., 2008).

По наблюдениям XMM – Newton были обнаружены широкие линии поглощения в рентгеновских спектрах некоторых XDINS (см. Zane et al., 2005 и ссылки в этой работе), которые интерпретируют как протонные (или ионные) циклотронные резонансные линии и/или атомные переходы, смещенные в рентгеновский диапазон из-за действия сильных магнитных полей ($B > 10^{13}$ Гс). Также такие сильные магнитные поля подтверждаются недавно полученными значениями производных периодов для четырех XDINS (RX J1856.5-375, RX J0720.4-3125, RX J1308.6+21, RX J2143.0+0654 (van Kerkwijk & Kaplan, 2008; Cropper et al., 2004; Kaplan & van Kerkwijk, 2005, 2009)). Оценки магнитных полей получились в пределах 10^{13} - 10^{14} Гс. Интересно, что на диаграмме $P - \dot{P}$ они занимают промежуточное положение между обычными радиопульсарами и магнетарами (Рис. 1).

Исследование с помощью популяционного синтеза и восстановление траекторий некоторых нейтронных звезд показали, что XDINS связаны с Поясом Гоулда (Pirov et al., 2003). В окрестностях Солнца эти нейтронные звезды численно превосходят радиопульсары того же возраста. И это означает, что объекты подобные XDINS могут являться наиболее типичными молодыми нейтронными звездами с галактическим темпом рождаемости больше, чем для «нормальных» радиопульсаров. Основные надежды, связанные с поиском объектов типа «Великолепной семерки», возлагаются на будущие более чувствительные космические обсерватории. Предпринимались неоднократные попытки обнаружить периодическое импульсное радиоизлучение или отдельные импульсы от XDINS (Johnston, 2003, Kaplan et al., 2003b, Rea et al., 2007, Kondratiev et al., 2008, 2009). К настоящему моменту радиоизлучение обнаружено только на низких частотах 40 – 111 МГц в ПРАО от двух объектов этого типа RX J1308.6+2127 и RX J2143.0+0654 (Malofeev et al., 2007). В работе (Kondratiev et al., 2009) приводятся верхние пределы для радиосветимостей на частотах 820 и 1400 МГц и дана оценка спектрального индекса $\alpha < -4$.

Возрастающий интерес к этим источникам связан с возможностью изучения атмосферы и, может быть, даже внутренней структуры нейтронной звезды (Paerels, 1997). Отсутствие нетепловых процессов впервые позволит взглянуть напрямую на поверхность нейтронных звезд.

Последняя группа из класса аномальных нейтронных звезд была открыта совсем недавно, всего несколько лет назад. Это радиотранзиентные источники (RRATS). Сейчас известно более 50 объектов этого типа. Они излучают короткими выбросами длительностью $\sim 2 - 30$ мс, с интервалами между вспышками от 4 минут до 3 часов. Десять источников имеют периодическое импульсное излучение с периодами $P \sim 0,4 - 7$ с (McLaughlin et al., 2006). Несмотря на сегодняшнюю малочисленность радиотранзиентных

источников, предполагается, что их общая популяция намного больше числа обычных радиопульсаров. Десять источников имеют периоды больше 4 с, для семи источников измерены производные периодов, которые дают оценки для магнитных полей $B \sim 10^{13}$ Гс. Это наталкивает на мысль о связи радиотранзиентов с группой «Великолепной семерки» и магнетарами. На диаграмме $P - \dot{P}$ радиотранзиенты занимают ту же область, что и XDINS (Рис.1.) (McLaughlin et al., 2006). Один из RRATS – J1819-1458 был обнаружен в рентгене с помощью телескопа XMM-Newton (McLaughlin et al., 2007). Было найдено импульсное излучение с периодом 4.26 с, предсказанным по радионаблюдениям. В то время как в радиодиапазоне RRATS излучают случайным образом (отдельные вспышки), в рентгеновских наблюдениях не было обнаружено никакой вспышечной активности или каких-либо непериодических изменений потока на протяжении всего времени наблюдений. Было отмечено, что рентгеновский спектр J1819-1458 похож на спектры XDINS, а также имеет широкую линию поглощения, как и у шести из семи XDINS. Также периодическое излучение от J1819-14 было зарегистрировано в ПРАО на частоте 111 МГц (Terlykh, 2009, Terlykh et al., 2009).

Вспышечный характер радиоизлучения RRAT напоминает другое явление, связанное с радиоизлучением пульсаров, - гигантские импульсы (Попов и др., 2006, Popov & Stappers, 2007, Попов и др., 2008). Так, например, радиопульсар B0656+14, один из трех ближайших пульсаров умеренного возраста, также называемых «Три мушкетера», считается близким RRAT (Weltevrede et al., 2006). На фоне слабого периодического излучения с широкими импульсами этот объект демонстрирует вспышки, гигантские импульсы (Kuzmin & Ershov, 2006), очень похожие на вспышки (одиночные импульсы) от радиотранзиентов. Расстояние до B0656+14 примерно равно 300 пк, если бы он находился на расстоянии в несколько

килопарсек, как все RRAT, то этот объект был бы обнаружен так же – по одиночным вспышкам.

Также к транзиентам относят «выключающийся» пульсар В 1931+24. Это очень интересный объект, в отличие от RRAT излучающий более продолжительное время (порядка 15 дней), после чего «выключается» на несколько недель. Когда он находится в активном состоянии, темп его замедления в два раза выше, чем когда он выключен (Kramer et al., 2006).

Актуальность темы

Особенности излучения аномальных пульсаров, описанные выше, указывают на важность исследования этих объектов во всех диапазонах длин волн. Эти источники интересны как новый класс объектов и их исследование важно для понимания феномена пульсара, а главное — его механизма излучения. Несмотря на большое количество предложенных моделей, до сих пор не сложилось единой картины понимания природы аномальных пульсаров. Настоящая работа посвящена поиску и исследованию радиоизлучения от нескольких групп аномальных пульсаров.

Вышеперечисленные группы аномальных пульсаров мало исследованы или вовсе не исследованы в радиодиапазоне. Необходимость наблюдений пульсаров в метровом диапазоне длин волн обуславливается особенностями их спектров, а именно наличием максимума, так как большинство наблюдаемых низкочастотных завалов в спектрах пульсаров начинается в районе частоты 100 МГц (Малофеев и Малов, 1980, Izvekova et al., 1981, Malofeev et al., 1994.). Кроме того, у пульсаров с крутыми спектрами максимум также в районе частоты 100 МГц и зачастую такие пульсары наблюдаются только на низких частотах (Малофеев и Малов, 1980). Высокая чувствительность наших наблюдений связана с наличием Большой синфазной антенной (БСА ФИАН) с эффективной площадью около 30000 м², которая является пока самой крупной в мире антенной в метровом

диапазоне длин волн и служит хорошим инструментом для исследования пульсаров (Виткевич и др., 1979, Кутузов и др., 2000)

Имеющийся в настоящее время дефицит наблюдений пульсаров на низких частотах, связанный с отсутствием в других странах чувствительных радиотелескопов, обеспечивает многим нашим исследованиям мировой приоритет. С вводом в строй в Европе новой высокочувствительной решетки LOFAR (Stappers et al., 2011), работающей в диапазоне 10 – 240 МГц, конкуренция в этом диапазоне значительно возрастет.

Цели и задачи исследования

Основной задачей работы является поиск и исследование радиоизлучения от аномальных пульсаров в метровом диапазоне длин волн с целью получения новых наблюдательных данных о механизме их радиоизлучения и эволюции. В работе исследовались аномальные рентгеновские пульсары (AXP), одиночные нейтронные звезды со слабым рентгеновским излучением (XDINS), а также радиотранзиенты (RRAT).

Научная новизна

В диссертации получен ряд новых результатов. Впервые обнаружено радиоизлучение от трех представителей класса «радиотихих» пульсаров. Вычислены основные характеристики радиоизлучения у четырех рентгеновских пульсаров, получены оценки расстояния до исследуемых объектов независимым способом. Подтверждено наличие радиоизлучения от AXP XTE J1810-197 на частоте 62 МГц.

Достоверность результатов

Представленные в диссертации результаты получены с использованием известных и апробированных методов наблюдений, обработки и анализа данных. Регистрация радиоизлучения от аномального

рентгеновского пульсара XTE J1810-197 на частоте 62 МГц, обнаруженного другими авторами на более высоких частотах, подтверждает способность наших инструментов и методов к регистрации сигналов подобного рода.

На опубликованные работы, включающие основные результаты диссертации, к настоящему времени имеется более 40 положительных ссылок, в основном, в ведущих журналах, включая зарубежные (например: Popov S. B., Turolla R., Possenti A., MNRAS, 369, L23 (2006); den Hartog P. R., Kuiper L., Hermsen W., Ap&SS, 308, 647 (2007); Rea N., Torres M. A. P., Jonker P. G. et al., MNRAS, 379, 1484 (2007); Istomin Ya. N. & Sobyenin D. N., Astron. Lett., 33, 660 (2007); Malov I. F. & Machabeli G. Z., Ap&SS, 308, 467 (2007); Motch C., Pires A. M., Haberl F., Schwobe A., Ap&SS, 308, 217 (2007); Kondratiev V. I., Burgay M., Possenti A., AIP, 983, 348 (2008); Zane S., Mignani R. P., Turolla R. et al., ApJ, 682, 487 (2008); Popov S., PPN, 39, 1136 (2008); Kondratiev V. I., McLaughlin M. A., Lorimer D. R, et al., ApJ, 702, 692 (2009); Trumper J., ASPC, 424, 113 (2010); Stappers B. W., Hessels J. W. T., Alexov A. et al., AAp, 530, 80 (2011); Danilenko A. A., Zyuzin D. A., Shibanov Yu. A., Zharikov S. V., eprint arXiv:1103.4871 (2011)).

Практическая значимость

Обнаружение радиоизлучения от исследуемых групп объектов представляет несомненный интерес для исследования аномальных пульсаров и пульсаров в целом. Излучение в радиодиапазоне накладывает ограничения на существующие модели, описывающие механизмы излучения пульсаров, а также требует поиска других механизмов, объясняющих это явление. Результаты работы используются ведущими наблюдателями и теоретиками во всем мире, например: Manchester R., Trumper J., Haberl F., Zane S., Mignani R., Turolla R., Stappers B., Lorimer D., McLaughlin M., Istomin Ya., Machabeli G., Malov I., Popov S., Shibanov Yu.)

Основные результаты, выносимые на защиту

1) Обнаружено радиоизлучение в метровом диапазоне длин волн у аномального рентгеновского пульсара (АХР) 4U 0142+61 и двух изолированных нейтронных звезд со слабым рентгеновским излучением (XDINS) 1 RXS J1308+21 и J2143+06. Измерены или оценены основные параметры: период и его производная, мера дисперсии и расстояние, плотность потока и средний профиль на нескольких частотах метрового диапазона, а также интегральная радиосветимость.

2) Впервые в радиодиапазоне получены средние профили АХР 1E2259+586, радиоизлучение от которого также обнаружено в ПРАО, на двух частотах 111 и 87 МГц, измерены период вращения и его производная, а также получены оценки спектрального индекса и интегральной радиосветимости.

3) Проведено сравнение основных параметров четырех радио-объектов с измерениями в рентгеновском диапазоне и выявлено, что главное различие заключается в длительности среднего профиля, а для двух XDINS еще и в наличии сильных временных флуктуаций радиоизлучения.

4) Подтверждено наличие радиоизлучения от АХР ХТЕ J1810-197, получен средний профиль импульса на частоте 62 МГц и измерена плотность потока.

Публикации и личный вклад автора

Результаты, изложенные в диссертации, опубликованы в 12 работах.

1. Malofeev V. M., Malov O. I., Teplykh D. A. “*Discovery of Radio Emission from Two Anomalous X-ray Pulsars*” IAU Symposium no. 218, 2004, p.261;
2. Малофеев В. М., Малов О. И., Теплых Д. А., Тюльбашев С. А., Тюльбашева Г. Э. «*Радиоизлучение от двух Аномальных рентгеновских*

- пульсаров»* *Астрономический журнал*, 2005, Т. 82, №3, с.273-280;
3. Malofeev V. M., Malov O. I., Teplykh D. A. “*Pulsed Radio Emission From Two XDINS*” *IAU, JD02, #31*, 2006;
 4. Malofeev V. M., Malov O. I., Teplykh D. A. “*Radio Emission from Anomalous X-ray Pulsars*” *Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics, Supplement*, 2006, V.6, Issue S2, p.68-73;
 5. Malofeev V. M., Malov O. I., Teplykh D. A., Logvinenko S. V., Litvinov I. I., Popov S. B. “*Discovery of radio emission from X-ray pulsar XDINS 1RXS J214303.7+065419*” *The Astronomer's Telegram*, #798, 2006;
 6. Malofeev V. M., Malov O. I., Teplykh D. A. “*Radio emission from AXP and XDINS*” *Astrophysics and Space Science*, 2007, V. 308, Issue 1-4, pp. 211-216;
 7. Теплых Д. А., Малофеев В. М., Малов О. И. «*Радиоизлучение от AXP и XDINS*», *Радиофизика и радиоастрономия*, Т.13, №3, 2008с.109-113,;
 8. Малофеев В. М., Теплых Д. А., Малов О. И. «*Обнаружение радиоизлучения от AXP 4U 0142+61*» *Астрономический журнал*, 2010, Т. 87, № 11, с.1082-1086.
 9. Malofeev V. M., Teplykh D. A., Logvinenko S. V. “*New observation of radio emission of two AXP at low frequencies*”, in the book: «*Pulsar conference 2010*» Publ.: The University of Cagliari, Chia, 2010, p.15; атакже Малофеев В. М., Теплых Д. А., Логвиненко С. В., «*Радиоизлучение от трех AXP на низких частотах*», *Астрономический журнал*, 2011 (в печати);
 10. Teplykh D. A. “*Radio emission from RRAT J1819-14 at low frequency*”, in: «*IV Gamow International Conference*», Publ.: The National University of Odessa, Odessa, 2009, p. 30.

11. Teplykh D. A., Malofeev V. M., Logvinenko S. V. “*Radio emission from RRAT J1819-14 at 111 MHz* ”. in: «16th Open Young Scientists’ Conference», Publ.: Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, 2009, p.25;
12. Теплых Д. А., Родин А. Е., Малофеев В. М., Логвиненко С. В. «*Новые данные по радиоизлучению двух XDINS на низких частотах*» Сборник трудов XIII Школы молодых ученых «Актуальные проблемы физики», Москва, Изд.: ФИАН, 2010, с. 211 – 212.

Во всех результатах, вынесенных на защиту, вклад автора является существенным. Наблюдения на БСА ФИАН, вычисление плотностей потоков, вычисление периодов и производных периодов, анализ и интерпретация полученных данных выполнены совместно с сотрудниками Лаборатории плазменных процессов в астрофизике ПРАО АКЦ ФИАН. Обработка результатов наблюдений велась самостоятельно с помощью пакета программ, созданных сотрудниками ПРАО ФИАН Маловым О. И., Тюльбашевым С. А., Логвиненко С. В., Шабановой Т. В.

Апробация работы

Основные результаты, полученные в диссертации, докладывались на научных сессиях АКЦ ФИАН, а так же на следующих российских и международных конференциях:

1. Школа-семинар молодых радиоастрономов «Техника и методы радиоастрономических исследований» (Пушино, 2002);
2. Всероссийская конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра» (Москва, 2002, 2008, 2009, 2010)
3. Международная студенческая научная конференция «Физика космоса» (Екатеринбург, 2003);

4. Всероссийская конференция «Физика нейтронных звезд» (Санкт-Петербург, 2005)
5. Конференция молодых европейских радиоастрономов (Дальфсен, 2006);
6. Конференция молодых европейских радиоастрономов (Бордо, 2007);
7. Гамовская летняя астрономическая школа «Астрономия на стыке наук: астрофизики, радиоастрономии, космологии и астробиологии» (Одесса, 2007, 2008, 2009, 2010);
8. Всероссийская астрономическая конференция (Казань, 2007);
9. Рабочее совещание «Низкочастотное исследование пульсаров» (Лейден, 2008);
10. Конференция молодых европейских радиоастрономов (Порту, 2009);
11. Открытая конференция молодых ученых «Астрономия и физика космоса» (Киев, 2009, 2010);
12. Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования» (Москва, 2010)
13. Всероссийская астрономическая конференция (Нижний Архыз, 2010);
14. Международная конференция «Пульсар-2010» (Киа, 2010);
15. Школа молодых ученых «Актуальные проблемы физики» (Звенигород, 2010);
16. Российско-финский симпозиум по радиоастрономии (Пушино, 2010).

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** дан краткий обзор современного состояния исследований одиночных «радиотихих» нейтронных звезд и радиотранзиентов. Кратко рассмотрены основные наблюдательные особенности всех групп «аномальных» пульсаров и теоретические модели, описывающие природу этих объектов. Обоснована актуальность темы диссертации, представлены основные цели работы, научная новизна, практическая значимость и основные результаты, выносимые на защиту.

В **Главе I** дается описание наблюдательной базы: радиотелескопов и приемной аппаратуры, используемых при наблюдениях пульсаров. Приводится методика обработки результатов наблюдений. Для обработки наблюдения слабых пульсаров была разработана специальная методика, позволяющая увеличить отношения сигнал/шум и выделить слабый сигнал. Методика основывается на отборе визуально видимых импульсов при вторичной обработке. Сформулировано несколько критериев подтверждающих достоверность полученных импульсов и позволяющих распознать ложный сигнал.

Глава II посвящена наблюдению аномальных рентгеновских пульсаров в радиодиапазоне. Представлены результаты обнаружения и исследования радиоизлучения от трех объектов этой группы в ПРАО в метровом диапазоне длин волн (1E 2259+586, 4U 0142+61 и XTE J1810-197). Приведены результаты наблюдения двух АХР (XTE J1810-197 и 1E 1547.0-5408) на более высоких частотах, опубликованные другими авторами. Для исследуемых аномальных рентгеновских пульсаров получены профили импульсов и динамические спектры на частотах 40, 62 и 111 МГц. Представлены наблюдаемые и вычисленные параметры радиоизлучения от АХР на частоте 111 МГц. Проведены сравнения с данными наблюдений в рентгеновском диапазоне. Главное различие между радио и рентгеновским излучением в том, что интегральный профиль в радиодиапазоне является существенно более узким. Получены независимые оценки расстояний до пульсаров, которые находятся в пределах интервалов расстояний, определенных другими методами.

Обнаружение радиоизлучения от четырех АХР, вместе с обнаружением в радиодиапазоне одного источника мягких гамма-всплесков (SGR) 1900+14 демонстрирует, что, по крайней мере, часть АХР и SGR не являются «радиотихими» объектами. Дополнительный аргумент в пользу общей природы радиоизлучения «нормальных» пульсаров и групп АХР –

SGR получен с открытием радиопульсара (J1847-0130) с большими значениями периода ($P = 6,7$ с) и производной периода ($\dot{P} = 1,3 \cdot 10^{-12}$ с/с), такими же как у AXP и SGR. Таким образом, сложившаяся ситуация приводит к необходимости или пересмотра механизмов радиоизлучения в модели магнетара, или к рассмотрению других моделей для AXP и SGR без привлечения сверхсильных магнитных полей.

В **Главе III** рассматриваются наблюдения сразу двух групп одиночных пульсаров: слабые рентгеновские изолированные нейтронные звезды (XDINS) или «Великолепная семерка» и радио транзиентные источники (RRAT) открытые по отдельным радиовспышкам. Эти объекты имеют схожие значения периодов и производных периодов, а на диаграмме $P - \dot{P}$ занимают одну область между обычными радиопульсарами и магнетарами. К тому же рентгеновский спектр одного из RRAT (J1819-14) похож на спектры XDINS, и имеет такую же широкую линию поглощения. В **Главе III** представлены результаты по обнаружению радиоизлучения у двух XDINS (1RXS J130848.6+212708 и 1RXS J214303.7+065419) и наблюдению одного RRAT J1819-14 на частоте 111 МГц. Для XDINS получены профили импульсов и динамические спектры на частотах 42, 62 и 111 МГц. Вычислены плотности потоков, радиосветимости, даны оценки расстояния до этих пульсаров. Проведено сравнение с данными рентгеновских наблюдений. Основное отличие, так же как и в случае AXP, состоит в существенном различии длительности импульса. Поиск радиоизлучения от XDINS активно проводился на частотах от 800 МГц и выше, но на сегодняшний момент не было зарегистрировано, ни периодического излучения, ни отдельных вспышек. По всей видимости, эти пульсары имеют крутой спектр, такой как у пульсара Геминга, где спектральный индекс $\alpha \geq -4$.

Кроме того, получены профиль импульса и динамический спектр для RRAT J1819-14, вычислена пиковая плотность потока и отношение

наблюдаемого количества импульсов к общему времени наблюдения, сделана оценка спектрального индекса. Возможно, на низких частотах этот пульсар наблюдается чаще.

В **заключении** кратко сформулированы результаты диссертационной работы.

Глава I. Наблюдательная база.

§ 1.1. Радиотелескопы ПРАО АКЦ ФИАН.

Наблюдения проводились в метровом диапазоне радиоволн в Пущино на радиотелескопах Физического института им. П.Н. Лебедева РАН: ДКР-1000 (полотно Восток - Запад) и БСА.

Радиотелескоп БСА ФИАН.

Антенна комплекса БСА Пущинской радиоастрономической обсерватории АКЦ ФИАН (Рис. I.1) представляет собой плоскую двумерную эквидистантную фазиремую по одной координате решетку с геометрической площадью $\sim 72000 \text{ м}^2$. (Виткевич и др., 1979) Эффективная площадь антенны с усилителями $A_0 \approx 20 \cdot 10^3 \text{ м}^2$ в направлении на зенит, а зависимость $A_{\text{эф}}$ от зенитного угла z аппроксимировалась выражением $A_{\text{эф}} = A_0 \cos z$ вплоть до $z = 55^\circ$. Размеры антенны 187x364 метров в направлении



Рис. I.1. Фотография радиотелескопа БСА ФИАН

Восток-Запад и Север-Юг соответственно. Антенна состоит из 16384 вибраторов, собранных в 256 рядов по 64 диполя в каждом, ориентированные в направлении Восток-Запад, и имеет одновременно 16 лучей (рис. I.2). Антенна работает в диапазоне 109-113 МГц с сектором сканирования 110° ($+90^{\circ} \div -20^{\circ}$ по склонению) (Кутузов и др., 2000). Дипольное полотно установлено над проволочным рефлектором на металлических опорах. Фидерные двухпроводные линии антенны размещены под рефлектором. Диполи одного ряда антенны образуют 4 группы по 16 вибраторов, последовательно включенных через волну в двухпроводной фидер первого этажа. Два следующих двухпроводных фидера второго и третьего этажей собирают эти группы по двоичной схеме в ряд. Схемно 256 вибраторов объединились по 8 в секцию, для управления диаграммой направленности которой, установлены 7 фазовращателей по двоичной схеме включения. Фазирующие ряды секции проводятся с помощью фазовращателей. На выходе каждой из 32-х секций включены антенные усилительные подстанции. После объединения по две секции через фазовращатель четвертого этажа, образуется 16 основных полотен антенной системы, сигналы от которых по магистральным кабелям подходят к 16 усилителям второго этажа усиления, и уже после них подаются на 16 входов фазирующей матрицы Батлера.

Формирование 16-ти лучевой диаграммы направленности БСА выполняется с помощью матричной схемы (матрица Батлера). Преимущества: можно вести одновременный прием с 16-ти направлений, не нужна система магистральных фазовращателей. Особенность матричной схемы с дискретным фазовым набором $360/n$ (где n – число лучей, равное числу элементов): низкий уровень пересечения соседних лучей, равным 0.5 в нашем случае. Для устранения этого недостатка перед матрицей БСА установлено дополнительное фазирующее устройство с прогрессивным сдвигом по входам матрицы в $0.5 \cdot 360/n$. При включении такого фазового

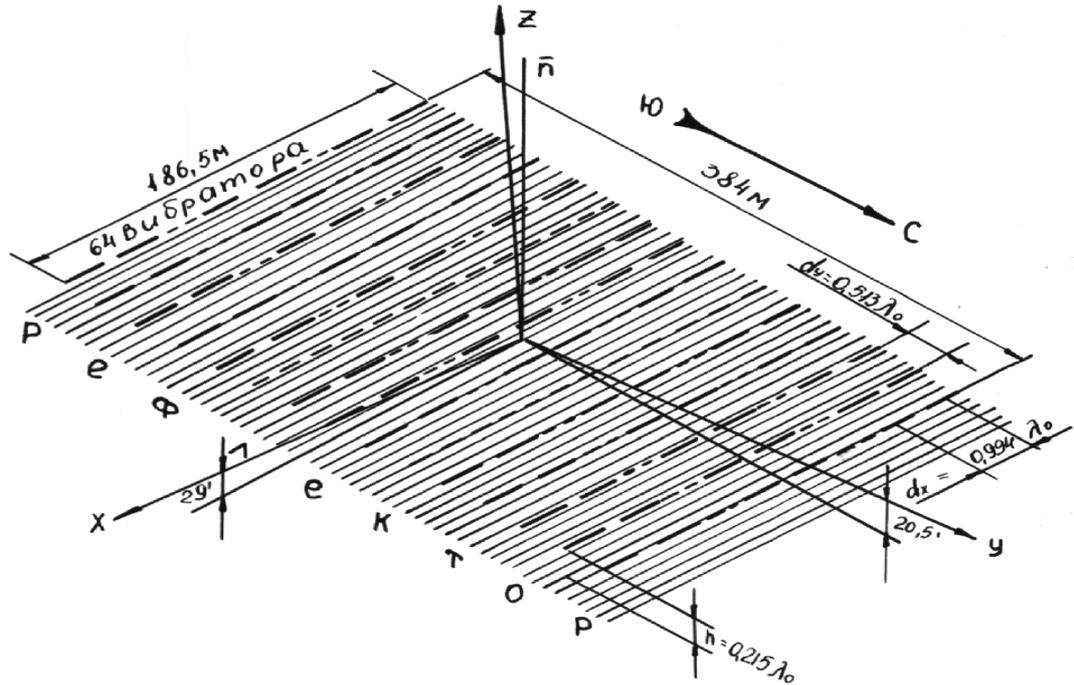


Рис. 1.2. Схема антенны БСА.

сдвига все 16 лучей переходят в новое направление, сдвинутое на 0.5 луча. Этот дополнительный сдвиг обеспечивает пересечение лучей на уровне 0.82 по мощности.

Подключение приемников к выходам матрицы осуществляется коммутатором. Процесс подготовки БСА для приема в выбранном направлении простой. Требуется определить номер луча и соответственно номер выхода матрицы Батлера, подключить радиометр к этому выходу и перевести в это направление диаграмму полотна, включив нужную комбинацию задержек в фазовращателях секций. Очевидно, что поле зрения БСА определено диаграммой полотна, а конкретное направление выбирается в пределах этого поля с помощью матрицы Батлера. Диаграмма секции представляется так, что пересечение соседних диаграмм происходит на уровне 0.88. Все переключения управляются компьютером. В принципе система позволяет наблюдать сразу в 256 лучах (16 лучей полотна × 16 полотен).

Предельная чувствительность радиотелескопа при приеме сигнала от пульсара определяется как (Малофеев, 1989)

$$\Delta S = \frac{\varepsilon 2kT}{A_{\text{эфф}} \sqrt{\Delta\nu_R N \tau}} \quad (\text{I.1})$$

где ε - коэффициент равный ≈ 0.7 при компенсационном методе приема, k – постоянная Больцмана, T – температура приемной системы, $A_{\text{эфф}}$ – эффективная площадь антенны, $\Delta\nu_R$ – полоса приема, τ - постоянная времени, N – число накопленных периодов. Повышение чувствительности приема при заданных τ и $A_{\text{эфф}}$ можно осуществить только увеличением N , τ и $\Delta\nu_R$. Расчетная флуктуационная чувствительность в направлении, например на пульсар АХР 4U 0142+61 на этот пульсар составляет величину ~ 1100 мЯн ($1 \text{ Ян} = 10^{-26} \text{ Вт/м}^2 \text{ Гц}$) при эффективной площади антенны равной 20000 м^2 , в полосе приема $1,28 \text{ МГц}$, длительности отсчета $0,051 \text{ с}$ и температуре фона и системы $\sim 2500 \text{ К}$. Такая чувствительность позволяет измерять на уровне 4σ пиковую плотность потока $S_{\text{п}} = 800 \text{ мЯн}$, при накоплении в среднем 50 периодов для пульсаров с большими периодами. Наши измерения дают величину среднего потока, размазанного по периоду $S = 30 \pm 20 \text{ мЯн}$, что составляет для пиковой плотности потока величину $S_{\text{п}} = 1740 \text{ мЯн}$, поскольку $S_{\text{п}} = S(P/w_{50})$, где P - период и w_{50} - длительность импульса пульсара по уровню 50% от максимума в секундах. Таким образом, реальная чувствительность антенны оказалась в два раза хуже расчетной, поскольку мы измеряем у пульсара пиковую плотность потока $S_{\text{п}} = 1740 \text{ мЯн}$ на уровне $(4 \div 5)\sigma$, а расчет дает $S_{\text{п}} = 800 \text{ мЯн}$ для уровня 4σ шумов.

Диапазонный крестообразный радиотелескоп ДКР-1000

ДКР-1000 – радиотелескоп меридианного типа с незаполненной апертурой, состоит из двух антенн, Север – Юг и Восток – Запад, расположенных в форме креста (Виткевич и Калачев, 1965). При наблюдениях использовалось полотно Восток – Запад (рис. I.3), которое



Рис. 1.3. Фотография радиотелескопа ДКР – 1000 полотно Восток – Запад.

представляет собой антенну типа параболический цилиндр размером 1000×40 метров с механическим поворотом по углу места, позволяющей наблюдать радиоисточники от -28° до 90° по склонению. Эффективная площадь: $\sim 8000 \text{ м}^2$ на частоте 60 МГц и $\sim 6000 \text{ м}^2$ на частоте 100 МГц. Рабочий диапазон частот 30 – 120 МГц. На антенне установлено 18 малошумящих усилителей, которые обеспечивают чувствительность на уровне 1σ приблизительно 2 янских на частоте 102,5 МГц при постоянной времени 0,1 с, полосе приемника 160 кГц и температуре фона $\sim 500^\circ \text{ К}$.

После модернизации телескопа, проведенной в конце 70-х годов, время наблюдения увеличилось до $(15 \text{ мин})/\cos\delta$ с помощью системы электрического дискретного сканирования диаграммы, создание новых антенных усилителей с системой фильтров улучшило помехозащищенность инструмента.

В случае наблюдения пульсаров на частоте 62 МГц, используя цифровой приёмник с полосой частот $4.88 \text{ кГц} \times 460 \text{ каналов} = 2245 \text{ кГц}$, постоянной времени 2.56 мс и накоплением $N = 1800$ периодов ($\sim 900 \text{ с}$ – диаграмма и 0.5 с средний период пульсара) при температуре фона $T \sim 12000\text{К}$ чувствительность на уровне 1σ составляет около 2 Янских. Таким образом, чтобы зафиксировать сигнал пульсара на уровне 4σ , его средний поток размазанный по периоду должен быть $S \approx 0.16$ Янских.

§ 1.2. Приёмная аппаратура

При выборе параметров приёмной аппаратуры для наблюдения пульсаров необходимо учитывать некоторые особенности радиоизлучения этих объектов. Наиболее отличительное свойство пульсаров — высокая стабильность прихода импульсов. При накоплении импульсов пульсара с известным периодом чувствительность повышается примерно в \sqrt{N} , N — число накопленных импульсов. Часть импульсов отсутствует из-за флуктуаций интенсивности излучения, например эффекта «nulling» (Ritchings, 1976). Поэтому, если обозначим $N_{\text{ш}}$ — число периодов, когда импульс отсутствует, то можно видеть, что отношение сигнал/шум (S/n) будет увеличиваться уже, как

$$S/n = (1 - \frac{N_{\text{ш}}}{N})\sqrt{N} \quad (I.2)$$

при условии, что импульсы одной амплитуды (Малофеев, 1989).

Принципиальным устройством радиометров для наблюдения пульсара является синхронизатор, устройство, основанное на синтезаторе периодов, использует строгую периодичность времени прихода импульсов и позволяет существенно улучшить отношение сигнал/шум.

Зависимость от частоты групповой скорости радиоволн при распространении через межзвездную среду при наблюдениях импульсного излучения приводит к временной задержке сигнала на низких частотах относительно более высоких. Запаздывание радиоизлучения возникает из-за того, что показатель преломления плазмы для электромагнитных волн зависит от длины волны. Величина запаздывания:

$$\Delta t = \frac{e^2(\lambda_1^2 - \lambda_2^2)}{2\pi mc} DM, \quad (I.3)$$

где e , m — заряд и масса электрона, c — скорость света, λ — длина волны, DM ($\text{пк}/\text{см}^3$) — мера дисперсии, показывает число свободных электронов на луче зрения (от объекта до наблюдателя) в столбике сечением 1 см^2 .

$$DM = \int_0^L N_e dl = \overline{N_e} L, \quad (I.4)$$

где N_e – концентрация электронов, dl – элемент длины вдоль луча зрения, $\overline{N_e}$ – среднее значение N_e , L – расстояние до источника. Таким образом, зная величину меры дисперсии, можно определить расстояние до пульсара независимым способом. Частотная зависимость моментов прихода импульса и дисперсионное уширение импульса накладывают определенные условия на выбор полосы приема и постоянной времени.

Другой отличительной особенностью излучения пульсаров является высокая степень линейной поляризации (например, см. (Lyne et al., 1971; Cole et al., 1970)). Степень поляризации, как правило, возрастает с понижением частоты и нередко достигает 100%. Поскольку в межзвездной среде имеются слабые магнитные поля, то плоскость поляризации линейно поляризованной волны вращается вдоль пути распространения — это известный эффект фарадеевского вращения. Угол вращения выражается:

$$\delta\chi = RM \cdot \lambda^2$$

$$RM = \frac{e^3}{2\pi m_e^2 c^4} \int_0^L n_e B_0 \cos \alpha dL \quad (I.5)$$

где RM — мера вращения, B — напряженность магнитного поля в Гс, а α — угол между лучом зрения и направлением магнитного поля. Фарадеевское вращение плоскости поляризации измеряется по изменению позиционного угла с частотой. Свойства линейно поляризованного излучения пульсаров на низких частотах ≤ 100 МГц исследовались в работах Сулеймановой (см., например, Сулейманова и Пугачев, 2002). Эту особенность излучения пульсаров также необходимо учитывать при выборе полосы приема приемной аппаратуры. Подробнее о выборе оптимальных параметров приемной аппаратуры для наблюдения пульсаров описано в работе Малофеева (1989).

За период исследования пульсаров в ПРАО был создан целый ряд многоканальных приёмников. В данной работе использовались фильтровые анализаторы спектра АС — 128 (128 кан. \times 20 кГц), АС — 32 (32 кан. \times 5 кГц), узкоканальный анализатор спектра УАС — 128 (128 кан. \times 1.25 кГц), и с 2006 г. наблюдения так же проводились с помощью нового цифрового многоканального приемника (512 кан. \times 4.88 кГц).

Уникальные цифровые многоканальные приемники, созданные в ПРАО для наблюдения пульсаров в настоящее время работают на частотах 40, 60 и 112 МГц. Принцип работы следующий (Логвиненко, 2006). Спектр сигнала вычисляется с помощью аппаратно реализованного 1024-точечного процессора БПФ (Быстрых Преобразований Фурье). Начало процесса формирования спектров сигнала определяется временем начала сеанса и периодом пульсара. Смежные по времени спектры могут суммироваться заданное количество раз в соответствии с временным разрешением. Минимальное временное разрешение составляет 0.2048 мс. После каждого импульса запуска формируется определенное количество таких суммарных спектров. Внутренняя шкала времени приёмников использует в качестве опорной частоты сигнал с частотой 5 МГц, поступающий от GPS приёмника. Абсолютное значение времени внутренней шкалы устанавливается по коду времени, получаемому NTP (Network Time Protocol) клиентом компьютера, в который встроены цифровые приемники, и производится аппаратная синхронизация счетчиков шкалы по переднему фронту сигнала 1 Гц GPS приёмника. Таким образом, точность временной привязки приёмников соответствует точности ведения времени GPS приёмника и составляет ± 30 нс.

Ширина рабочей полосы приёмников составляет 2.5 МГц и с помощью БПФ разбивается на 512 спектральных каналов с шириной каждого канала 4.88 кГц. По причине особенностей реализации переноса частот и фильтрации сигнала в обработке использовались каналы 10 — 470 в полосе

2.245 МГц с компенсацией дисперсионного запаздывания сигнала к частотам 62.2936, 42.7911 и 112.084 МГц, соответствующим 470 каналу. Узкая полоса канала является одним из главных преимуществ новых приёмников, поскольку позволяет уменьшить влияние уширения импульсов в полосе приёма из-за дисперсионного запаздывания. Для каждого приёмника параметры наблюдений задаются индивидуально, это позволяет проводить одновременные наблюдения на трех частотах.

§ 1.3. Методика наблюдений и обработки

Наблюдения проводились на радиотелескопе ДКР-1000 на частотах 42, 62 и 87.7 МГц и на БСА ФИАН на частоте 111.23 МГц. При измерении плотностей потоков использовался калибровочный сигнал, для чего синхронно с периодом пульсара подавалась ступенька шумового генератора. Величина ступеньки калибровалась по точечным дискретным источникам с известными плотностями потоков. Таким образом, мы использовали относительный метод измерения потоков пульсаров. В редких случаях, когда калибровочный сигнал не прописывался для данного пульсара, но присутствовал в записях других пульсаров данной серии, то плотность потока вычислялась с помощью калибровки по шумовой дорожке.

В результате наблюдений получается файл данных, содержащий служебную информацию, а также накопленный с периодом пульсара сигнал для всех каналов, используемых в наблюдениях. Обработка результатов наблюдений проходила с помощью компьютера.

Для слабых источников сигнал не всегда превышает 4σ шумов. В этом случае дополнительно проводится несколько вариантов суммирования для уверенного выделения сигнала: по нескольким дням в одной серии, и даже по нескольким сериям, а кроме того по группам каналов с периодом, кратным нескольким периодам пульсара. Одним из критериев является наличие двух и более импульсов при накоплении сигнала с кратным периодом.

1.3.1. Поисковая программа

Для поиска новых пульсаров С.А. Тюльбашевым была создана специальная программа, которая способна выделить слабые периодические импульсы из шума, используя Фурье-анализ (Тюльбашев и Малов, 2000). Основа поисковой программы – построение спектра мощности, его визуальный контроль, а также автоматический поиск пиков в спектре мощности, превышающий уровень шумов 7σ . Первый вариант этой программы был опробован при поиске пульсаров в выборке слабых мерцающих источников (Малофеев и др., 2000). В конце 2001 г. проведена

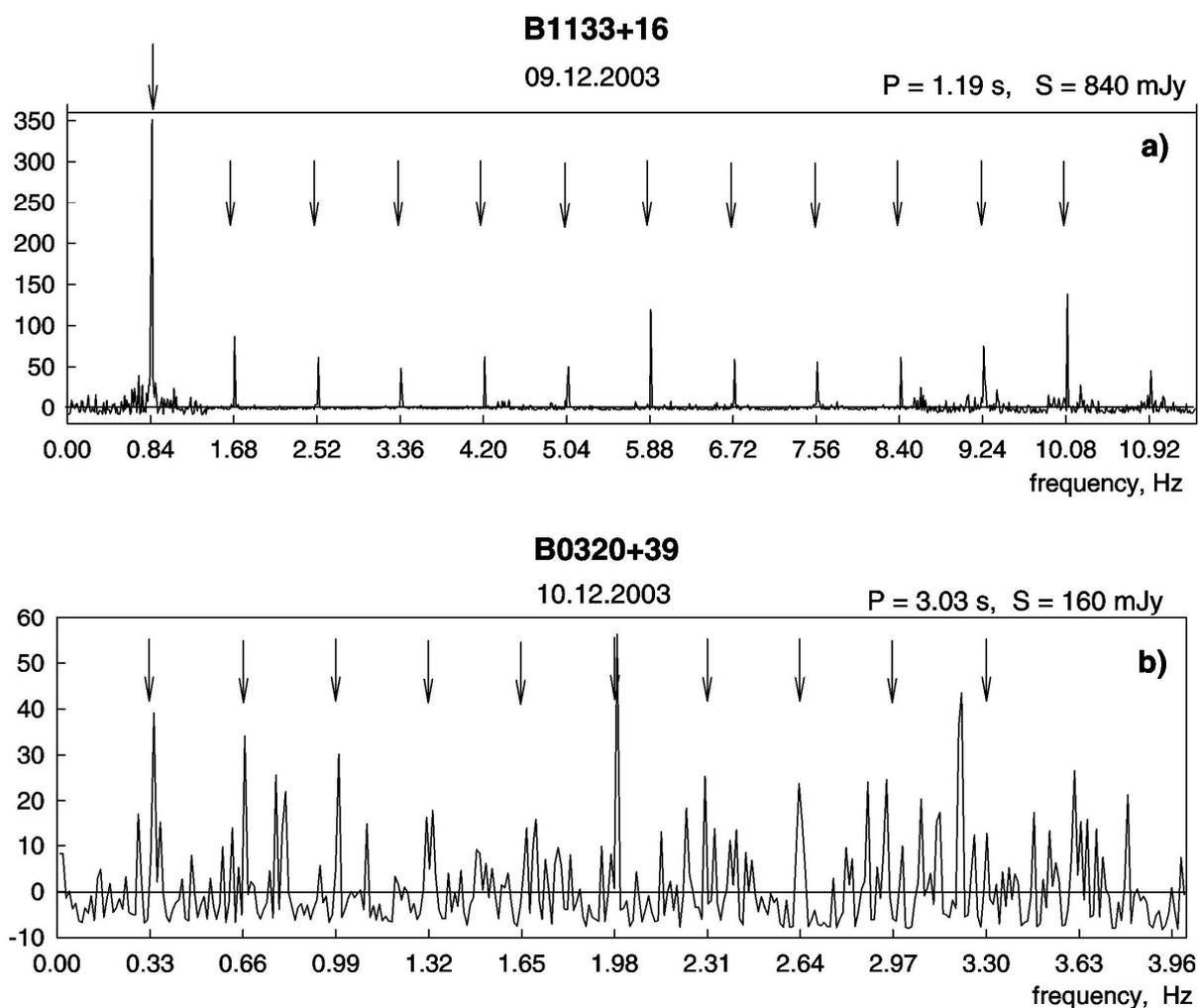


Рис. 1.4. Примеры фурье-спектров двух пульсаров: (a) – B1133+16; (b) – B0320+39. Фурье-гармоники обозначены стрелками.

модернизация этой программы. Это позволило сделать следующее. Во-первых, во всех каналах проводить нормировку так, чтобы дисперсия сигнала в каждом канале равнялась единице (т.е. усиление выравнивалось во всех каналах). Во-вторых, производить учет возможной меры дисперсии сигнала с помощью циклического сдвига в соответствующих каналах. При поиске рассматривались меры дисперсии, не превосходящие 100 пк/см^3 . Так что, в-третьих, для каждой меры дисперсии производилось сложение сигналов во всех каналах. И, наконец, в-четвертых, строились спектры мощности для всевозможных вариантов мер дисперсии, а далее производилось сложение гармоник, и затем, поиск гармоник, у которых отношение сигнал/шум больше чем заданный уровень. Тестирование данной программы по наблюдениям известных пульсаров показывает, что уверенно обнаруживаются пульсары с потоком $\geq 70 \text{ мЯн}$.

На рис. 1.4 приведены примеры амплитудных спектров для двух пульсаров на частоте 111 МГц. Вверху рисунка показан фурье-спектр сильного пульсара B1133+16, плотность потока которого $S = 840 \text{ мЯн}$. Четко видны 13 фурье-гармоник спектра. Внизу приведен пример более слабого пульсара B0320+39 с плотностью потока в 5 раз меньше ($S = 160 \text{ мЯн}$). В спектре присутствуют первые девять фурье-гармоник, но видны не так явно как в первом случае.

1.3.2. Наблюдения с помощью нового цифрового приёмника

В новом многоканальном цифровом приёмнике реализуются два режима записи сигнала: регистрация индивидуальных импульсов (использовался для большинства наблюдений) и накопление сигнала с получением суммарного профиля импульса (Малофеев и др., 2011). В случае использования первого режима каждый полученный спектр регистрируется на жестком диске компьютера. Для второго режима после каждого импульса

запуска производится суммирование спектров с одинаковыми по отношению к каждому импульсу запуска номерами. На жестком диске записывается только один суммарный для всего сеанса наблюдений динамический спектр периода пульсара. Для арифметических вычислений используется формат представления чисел с плавающей запятой, что значительно повышает динамический диапазон представленных данных и предотвращает ошибки вычислений, связанных с использованием целочисленной арифметики.

В программах обработки реализуется несколько способов чистки от помех:

1) *Чистка по частотам* позволяет исключать каналы пораженные помехами. На рис. I.5 приведены примеры спектров мощности источника на частотах 62 и 111 МГц. При наблюдениях на 111 МГц из спектра убраны несколько каналов из 460, при наблюдениях на 62 МГц от 20 до 50% каналов поражены помехами и порой приходится уменьшать полосу и оставлять для обработки ~ 300 каналов. Программы обработки позволяют производить чистку записей от помех, как в автоматическом, так и в ручном режиме. Эта возможность оказалась весьма актуальной, особенно для низкочастотных диапазонов 40 и 60 МГц.

2) *Чистка по времени* позволяет исключать из накопления несколько периодов с сильными помехами ($S/n \geq 5$), которые видны при $DM = 0$. На частоте 111 МГц это, как правило, менее 5% периодов, на частоте 62 МГц около 15%. На рис. I.6. приведены примеры сильной ($S/n = 24$) и слабой ($S/n = 4.6$) помех.



Рис. 1.5. Спектры мощности при наблюдениях на 111 МГц (а) и 62 МГц (б) за 01.02.2011. Красным выделены каналы, исключенные из обработки.

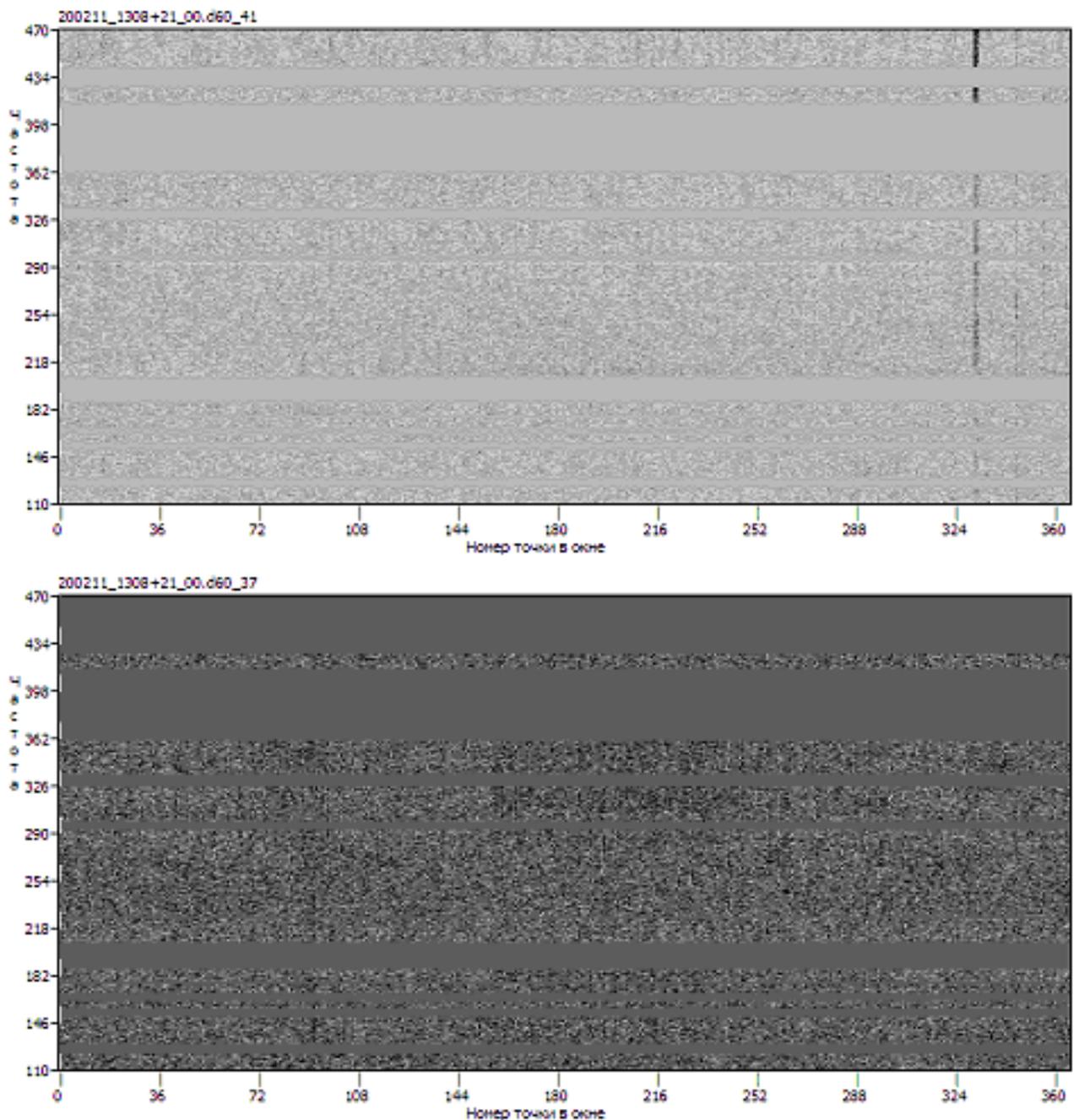


Рис. 1.6. Примеры пораженных помехами динамических спектров пульсара J1308+21 на частоте 62 МГц за 20.02.2011. Пример сильной помехи с $S/n = 24.5$ в фазе 335, которая присутствует во всем частотном диапазоне (60.5483 - 62,2951 МГц) соответствующему номерам каналов 110 – 470 (вверху). Пример слабой помехи с $S/n = 4.6$ в фазе 93 в том же частотном диапазоне (внизу).

При обработке наблюдений пульсаров проводилась предварительная чистка от помех, затем суммирование по всем свободным от помех периодам пульсара. Далее осуществлялся перебор мер дисперсии и в случаях, когда суммарный импульс имел отношение сигнал/шум ≥ 3 , проводилась дальнейшая обработка записи — повторное суммирование с отбраковкой импульсов с $S/n \leq 1.5$, т.е. для дальнейшей обработки отбирались визуально видимые импульсы. Такой подход значительно увеличивает отношение сигнал/шум, но также и существенно заужает профиль импульса. Эта методика была отработана на нескольких известных пульсарах. На рис. I.7(а) приведен пример профиля импульса пульсара B0950+08 на частоте 111 МГц за 8.01.09, полученный суммированием всех 255 тройных периодов пульсара. Отношение сигнал/шум $S/n \sim 70$, длительность первого импульса по уровню 50% амплитуды $w_{50} = 22$ мс. Если суммировать только те периоды, где есть сигнал, например, в фазе прихода первого импульса (рис. I.7(б)), то в накоплении участвуют всего 94 импульса, а отношение сигнал/шум увеличится до 103.2, в то время как длительность наоборот уменьшится до 12.2 мс. В среднем профиль заужается на 28%, а отношения сигнал/шум увеличивается приблизительно на 50%.

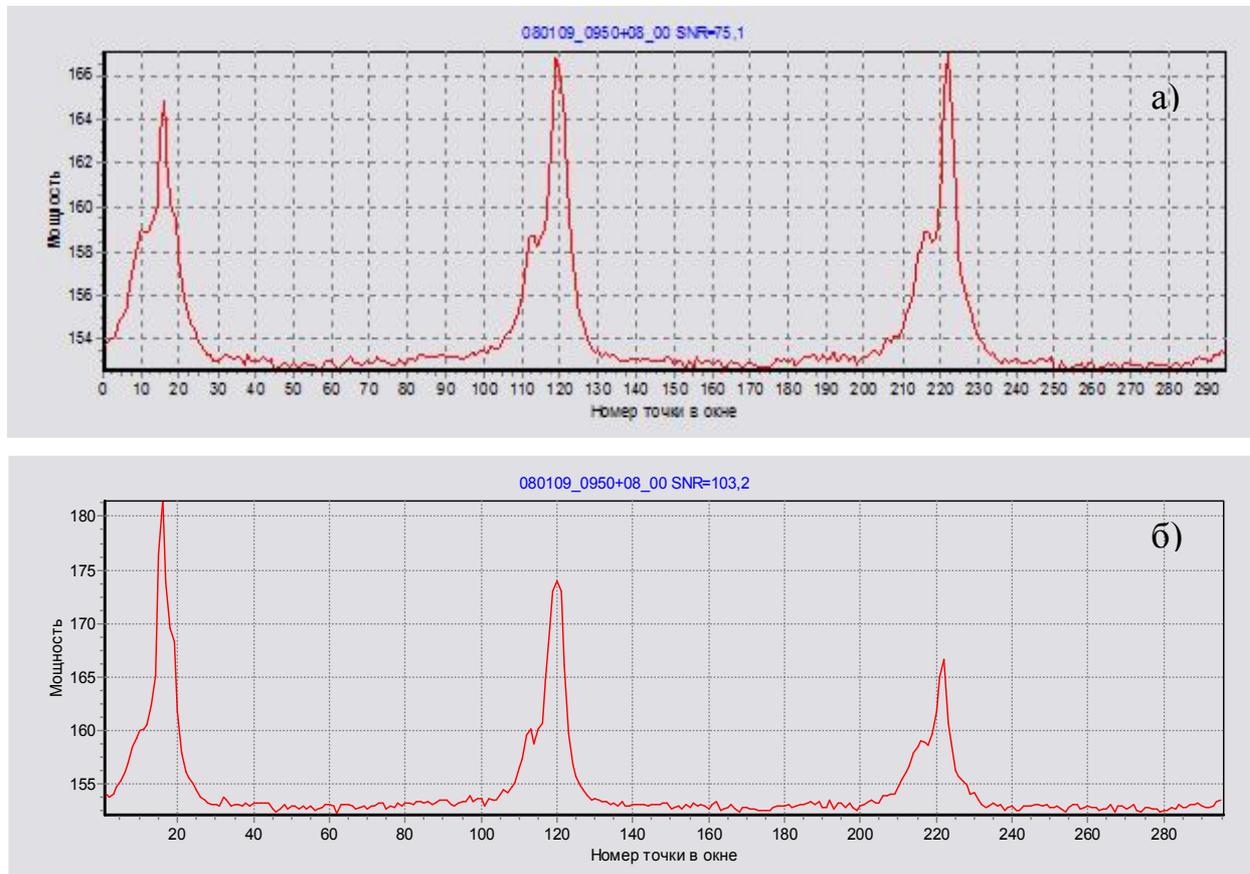


Рис. 1.7. Профили импульсов V0950+08 за 8.01.09, полученные суммированием 255 групп тройных периодов (а) и суммированием 94 импульсов в фазе прихода первого импульса (б)

Очевидно, что если исключить из обработки все периоды с отрицательными значениями в какой-то одной случайно выбранной точке, то в этой точке накопится ложный импульс. Возможность накопления сигнала в ложной фазе была также неоднократно проверена. На рис. I.8 — I.10 показаны профили импульсов и динамические спектры пульсара B2310+42 на частоте 111 МГц за 25.09.10, наблюдения проводились с тройным периодом. Профиль импульса на рис. I.8 (вверху) получен сложением всех 250 групп (тройных периодов пульсара), для двух первых импульсов $S/n = 10.6$. На рис. I.8 (внизу) приведен динамический спектр сигнала пульсара. Далее проводился отбор видимых импульсов пульсара в фазе $\phi = 115.38$ (второй пик). В итоге было отобрано 37 групп или 14.8 % от общего числа групп. Полученный в результате суммирования отобранных импульсов профиль и динамический спектр приведены на рис. I.9, отношение сигнал/шум выросло до значения 15.2, т.е в 1.5 раза. Для проверки возможности накопления импульса в ложной фазе было проведено суммирование видимых импульсов (с отношением сигнал/шум $S/n \geq 1.5$) в случайной точке, не совпадающей с истинными фазами приходов импульсов (например в $\phi = 10$, где $S/n = 0$). Профиль такого ложного импульса, полученного суммированием 9 групп или 3,4% от общего числа групп, показан на рис. I.10. Из рисунка видно, что не смотря на большое значение отношения сигнал/шум ($S/n = 10.3$), ширина профиля ложного импульса по уровню 50% амплитуды сильно отличается от ширины истинного сигнала (Рис. I.9) и составляет приблизительно 1 отчет или 5.376 мс. Кроме того, трек на динамическом спектре от ложного импульса (Рис. I.10, фаза = 10) более слабый по сравнению с импульсом пульсара, примерно с тем же отношением сигнал/шум (Рис. I.8, первый импульс). По яркости трек от ложного сигнала сравним с сигналом, например, второго импульса пульсара на рис. I.10, который имеет существенно меньшее отношение сигнал/шум, $S/n \approx 6.4$. Кроме того, ложный сигнал отличает очень резкое по сравнению с реальным

импульсом изменение отношения сигнал/шум при небольшом изменении меры дисперсии (рис. I.11).

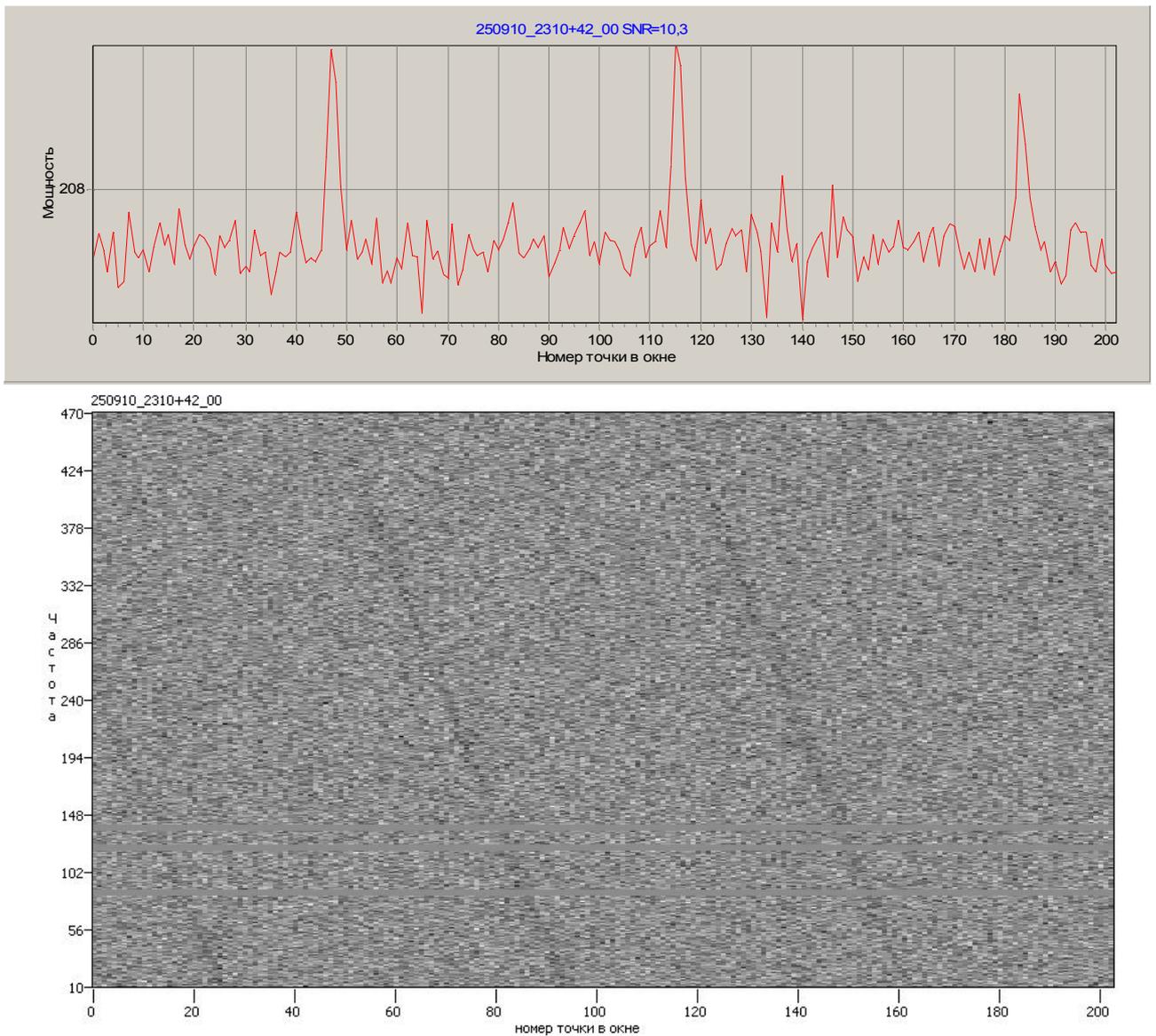


Рис. I.8. Профиль импульса пульсара B2310+42 на 111 МГц за 25.09.10, полученный суммированием 250 групп (тройных периодов) (вверху) и динамический спектр (внизу).

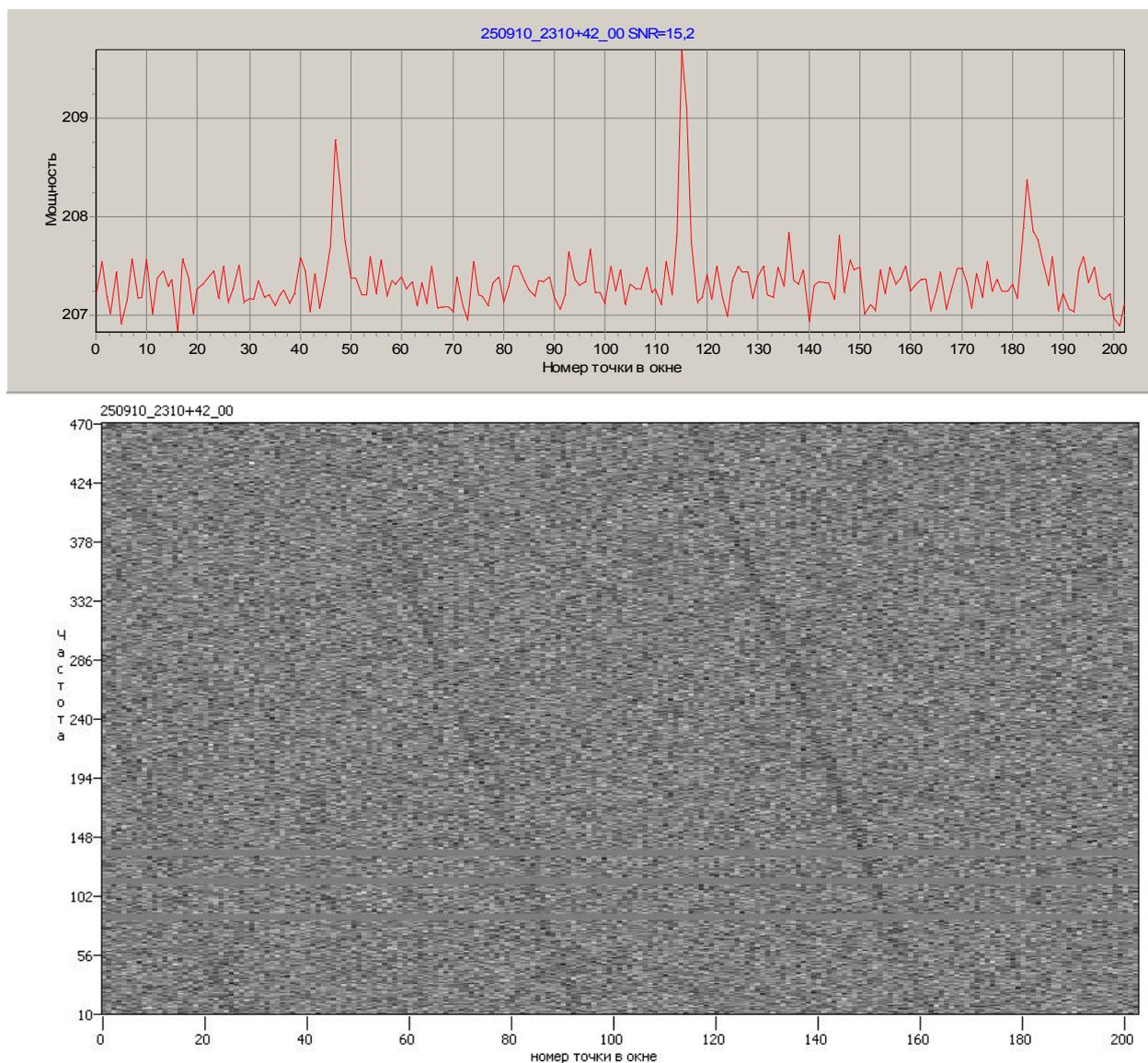


Рис.1.9. Профиль импульса пульсара B2310+42 на 111 МГц за 25.09.10, полученный суммированием 27 групп (тройных периодов) (вверху) и динамический спектр (внизу).

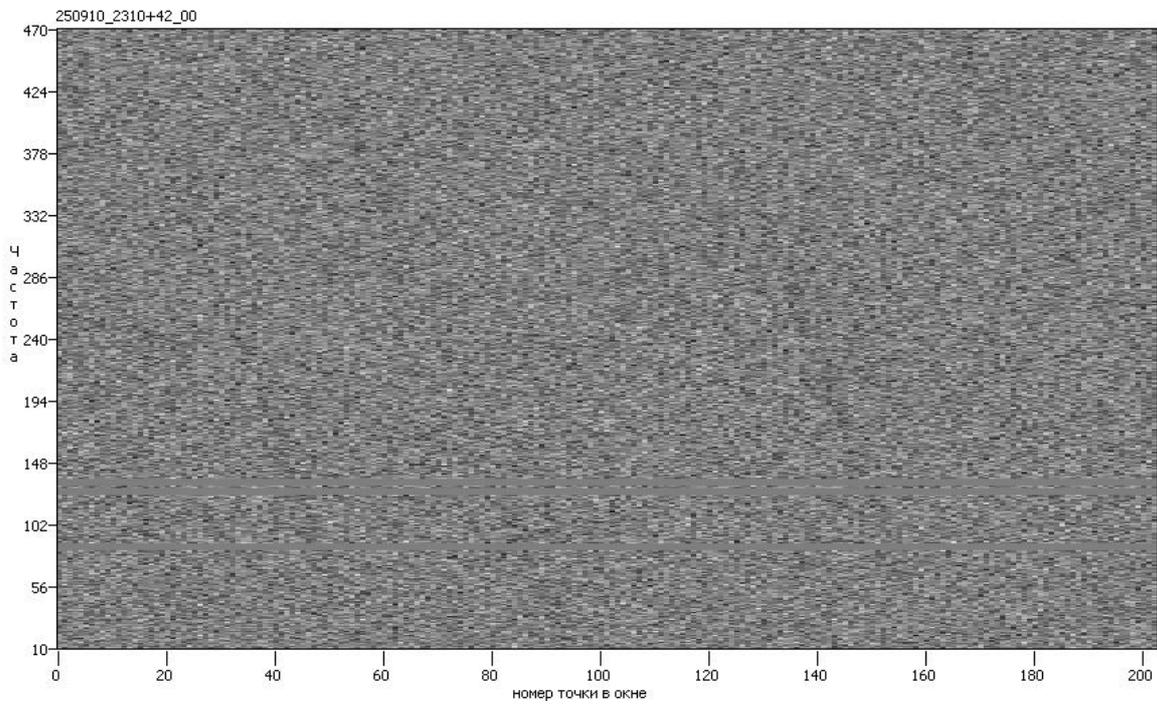
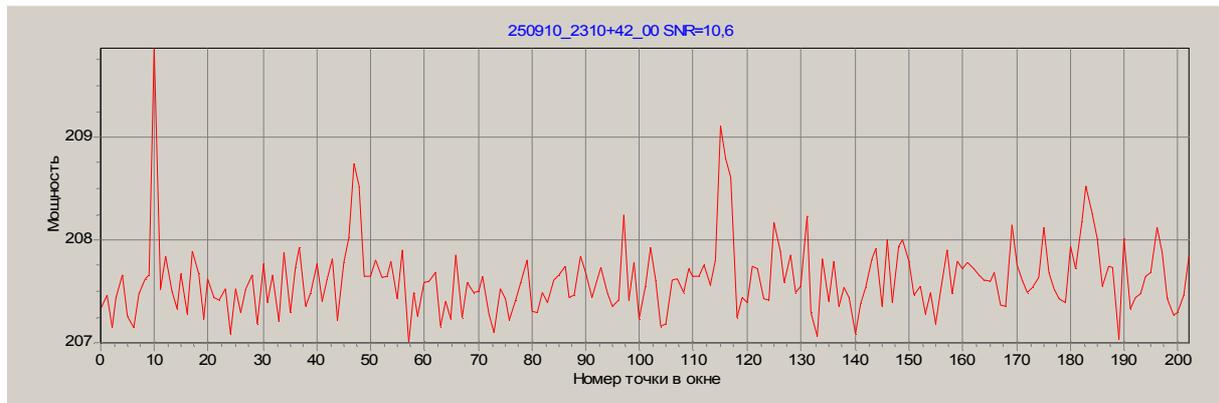


Рис. 1.10. Профиль импульса пульсара $B2310+42$ на 111 МГц за $25.09.10$, полученный суммированием 9 групп (тройных периодов) (вверху) и динамический спектр (внизу).

В результате проведенного исследования было сформулировано несколько критериев, позволяющих отличить ложный импульс от реального сигнала (Малофеев и др., 2011):

1) в суммировании необходимо присутствие $\geq 20\%$ периодов. Данное требование связано с тем, что если мы имеем дело с чисто шумовым процессом, подчиняющемся нормальному закону, то вероятность случайного сигнала с отношением сигнал/шум $\geq 1.5\sigma$ равна $\sim 13.4\%$ случаев, а с учетом того, что мы фиксируем только сигнал с положительной амплитудой, то вероятность уменьшается в два раза и составляет уже 7% (см. например, Ивашев-Мускатов, 1979). Поэтому для более уверенного выделения сигнала пульсара, мы задаем критерий $\geq 20\%$;

2) необходимо наличие нескольких сильных ($S/n \geq 3\sigma$) индивидуальных импульсов в выбранной фазе, поскольку вероятность случайного положительного шумового сигнала равна при этом 0.14% ;

3) отношение сигнал/шум должно плавно падать при небольшом изменении значения меры дисперсии (на $5-10\%$) (рис. I.11), тогда как для шумового сигнала характерным является быстрое падение отношения сигнал/шум;

4) длительность импульса должна превышать интервал считывания в два и более раз, поскольку для шумового импульса характерная ширина равна интервалу считывания;

5) необходимо повторение сигнала с $S/n \geq 4$ в выбранной или близкой фазе в двух временных интервалах накопления в течение одного сеанса наблюдения или при последующих наблюдениях в одной серии;

6) необходимо наличие диспергирующего сигнала в динамическом спектре, поскольку для помехи характерным является сигнал без дисперсии по частоте.

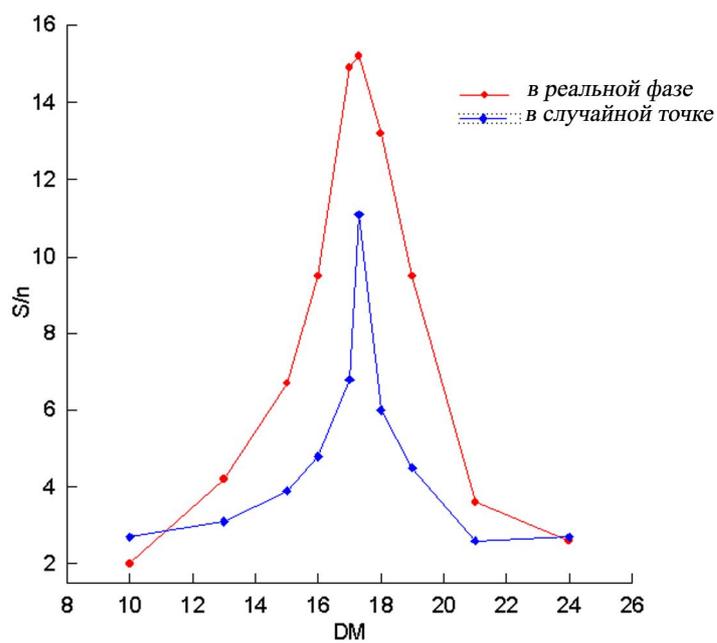


Рис. 1.11. Пример зависимости отношения сигнал/шум от меры дисперсии для реального сигнала (красные кружки) и искусственно накопленного в случайной точке (синие ромбы).

Глава II. Аномальные рентгеновские пульсары.

§ 2.1. Обнаружение АХР в радиодиапазоне.

Группа АХР включает в себя 9 объектов (см. табл. II.1). Напомним, что от нормальных радиопульсаров эти объекты отличаются большими периодами, лежащими в относительно узком диапазоне 5–12 с, и большими значениями производной (10^{-11} – 10^{-13} с/с). Кроме того, несмотря на такие большие периоды вращения, они считаются молодыми объектами с характеристическим возрастом до нескольких сотен тысяч лет. Все источники расположены вблизи плоскости Галактики и почти половина из них находится в остатках вспышек сверхновых. От обычных рентгеновских пульсаров магнетары отличаются наличием постоянного замедления периода, лежащего в узком диапазоне, более стабильным рентгеновским потоком и более слабой рентгеновской светимостью (10^{34} – 10^{36} эрг/с). Кроме того, АХР имеют более мягкий спектр излучения, который часто описывается комбинацией чернотельного излучения и степенного участка с крутым показателем спектра (2.5–4.0). Самое существенное отличие этих объектов от остальных рентгеновских пульсаров заключается в отсутствии заметного компаньона, т.е. это одиночные нейтронные звезды. Все эти особенности представлены в обзорах и оригинальных работах (Mereghetti, 1999; Hurley, 2000; Малов и др., 2003; Duncan & Thompson, 1992; Israel et al., 1999; Истомин и Комберг, 2000). Основной проблемой у этих объектов остается проблема источника энергии, дающего порой на два–три порядка большую светимость, чем могут обеспечить потери кинетической энергии вращения, связанные с замедлением вращения у “нормальных” пульсаров. Обнаружение радиоизлучения у таких интересных объектов накладывает определенные ограничения на механизмы излучения и, возможно, позволит прояснить природу излучения пульсаров в целом.

На сегодняшний день в радиодиапазоне обнаружено 4 аномальных рентгеновских пульсара 1E 2259+586 (Malofeev & Malov, 2001; Малофеев и др., 2005), XTEJ1810-197 (Halpern et al., 2005), 1E 1547.0-5408 (Camilo et al., 2007a) и 4U 0142+61 (Теплых и др., 2008, Малофеев и др., 2010).

Табл. II.1. Список АХР

№	Источник	P, с	P'	lg L_x (erg/s)	lg \dot{E} (erg/s)
1	1E1048.1-5937	6.45	12.2×10^{-11}	34.30	33.51
2	1E2259+586 *	6.98	7.3×10^{-13}	34.90	31.93
3	4U0142+61 *	8.69	3×10^{-12}	34.90	32.26
4	RXSJ170849-4009	11.00	3×10^{-11}	35.95	32.95
5	1E1841-045	11.77	4.7×10^{-11}	35.48	33.06
6	AXJ1845.0-0258	6.97		34.70	
7	XTEJ1810-197 *	5.54	1×10^{-11}	~36	33.6
8	CXOU J0110043.1-721134	8.0			
9	1E 1547.0-5408 *	2.07	2.3×10^{-11}		35.00

* отмечены пульсары, наблюдаемые в радиодиапазоне.

Пульсар XTEJ1810-197 был открыт в 2003 г., как первый АХР с транзиентным излучением, светимость которого менялась в 100 раз (Ibrahim et al., 2004), Год спустя на VLA был обнаружен соответствующий радиоисточник (Halpern et al., 2005). XTE J1810-197 демонстрирует узкие, мощные радиоимпульсы и высокую степень линейной поляризации (Camilo et al., 2006) (Рис. II.1). Импульсное радиоизлучение с периодом 2.318 с. от 1E 1547.0-5408 было зарегистрировано на телескопе АТСА в 2007г. (Camilo et al., 2007a) в остатке сверхновой G 327.24 – 0.13. Соответствующий рентгеновский источник, идентифицированный как магнетар, не проявляет рентгеновских пульсаций. 1E 1547.0-5408 демонстрирует широкий профиль импульса (Рис. II.2). Аналогично XTE J1810-197, и в отличие от большинства пульсаров, этот пульсар имеет плоский спектр ($\alpha = 0.9$) (Camilo et al., 2007d).

У обоих объектов наблюдаются значительные вариации плотности потока, как длительные, так и кратковременные (изо дня в день, в течении одного часа, и даже от импульса к импульсу). А также оба пульсара проявили активности в радио после вспышек или увеличения потока в рентгене.

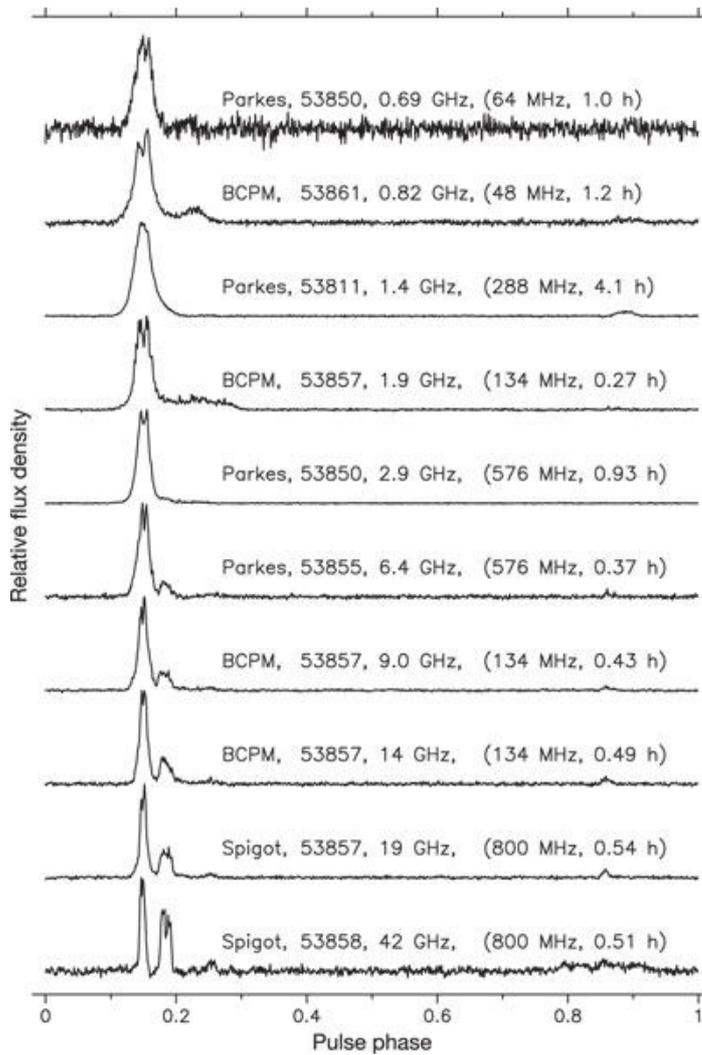


Рис. II.1. Средние профили импульсов для XTE J1810-197 на частотах 0,7 – 42 ГГц. (из работы Camilo et al., 2006)

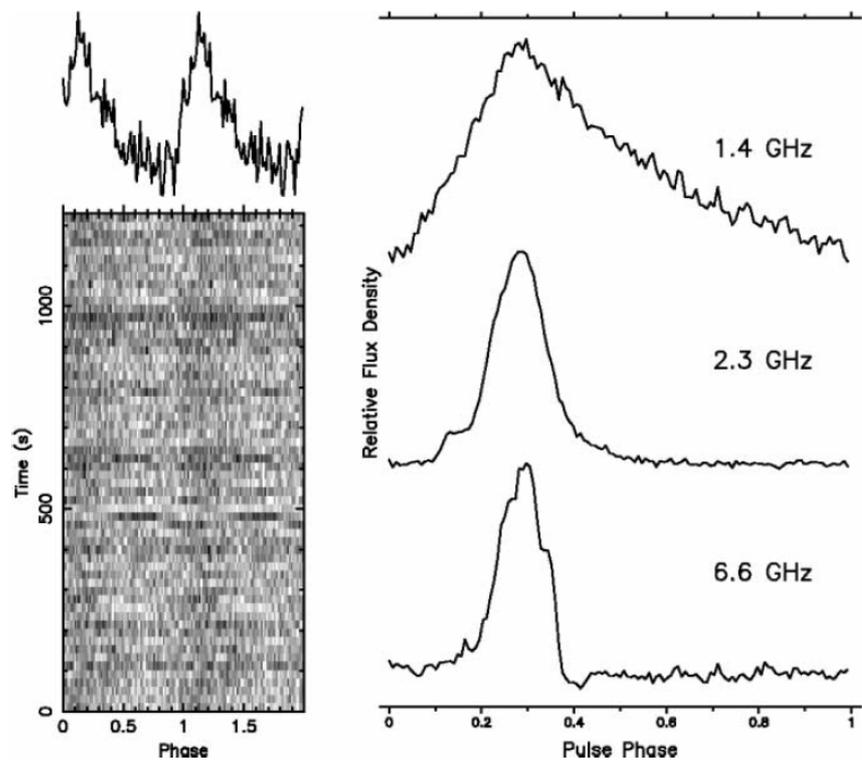


Рис. II.2. Наблюдения 1E 1547.0 – 5408. Слева: наблюдения 8.06.2007 г. на 1.4 ГГц. Профиль импульса приведен дважды. Справа: Средние профили импульса на 1.4, 2.3 и 6.6 ГГц. (из работы *Samilo et al., 2007a*).

§ 2.2. Наблюдения АХР 1E 2259+586

Результаты представленные в §2.2 и §2.3 опубликованы в следующих работах: Malofeev et al., 2004, 2006, Малофеев и др., 2005, 2010, 2011, Теплых и др., 2008

Наблюдения АХР 1E 2259+586 начались 7 марта 1999 г. и в первые два года было сделано 19 измерений. Регулярные наблюдения по 3–15 дней в каждые один–два месяца проводятся с февраля 2001 г. В работу вошли данные, полученные по сентябрь 2010 г. Основная масса наблюдений проведена на высокочувствительном радиотелескопе БСА ФИАН на частоте 111 МГц. Кроме того, время от времени проводились одновременные наблюдения на втором радиотелескопе – полотне Восток-Запад ДКР-1000 ФИАН на частотах 87 или 62 МГц. С целью более уверенной регистрации импульса в режиме интегрального накопления наблюдения АХР 1E 2259+586 были выполнены с двойным периодом по методике, отработанной при наблюдениях слабых и миллисекундных пульсаров (Малофеев и др., 2000), а также пульсара Геминга (Malofeev & Malov, 1997). Часть наблюдений была выполнена с калибровкой по опорным дискретным радиоисточникам с известной плотностью потока.

Обработка данных наблюдений АХР 1E 2259+586 за 1999–2000 г. позволила обнаружить в конце 2000 г. слабое импульсное периодическое радиоизлучение, существенно отличающееся по средней форме импульса от данных в рентгеновском диапазоне. Была измерена средняя плотность потока, оказавшаяся равной 70 мЯн, удалось оценить меру дисперсии 79 ± 5 пк/см³ и тем самым дать первичную оценку расстояния до пульсара (3.6 кпк) (Malofeev & Malov, 2001). Для АХР 1E2259+586 за весь период наблюдений проведены 321 сеанс на частоте 111 МГц, 33 – на частоте 87 МГц и 5 – на частоте 61 МГц. Около трети наблюдений испорчено наличием большого уровня помех, а более трети дней сигнал пульсара не превышал 4σ , поэтому

для дальнейшего анализа было оставлено 89 дней на частоте 111 МГц и 7 дней на частоте 87 МГц. К сожалению, на частоте 61 МГц, возможно из-за помех, сигнал не был обнаружен.

2.2.1 Поиск периодического излучения с неизвестным периодом

Поиск периодического излучения с неизвестным периодом проводился с помощью поисковой программы (Тюльбашев и Малов, 2000), см. §1.3.1. При поиске рассматривались меры дисперсии, не превышающие 100 пк/см^3 . Тестирование данной программы по наблюдениям известных пульсаров показывает, что уверенно обнаруживаются пульсары с потоком $\geq 70 \text{ мЯн}$. С использованием этой модернизированной программы поиска были проведены наблюдения для 1E2259+586 в рамках программы поиска периодического импульсного радиосигнала от более чем 30 кандидатов –

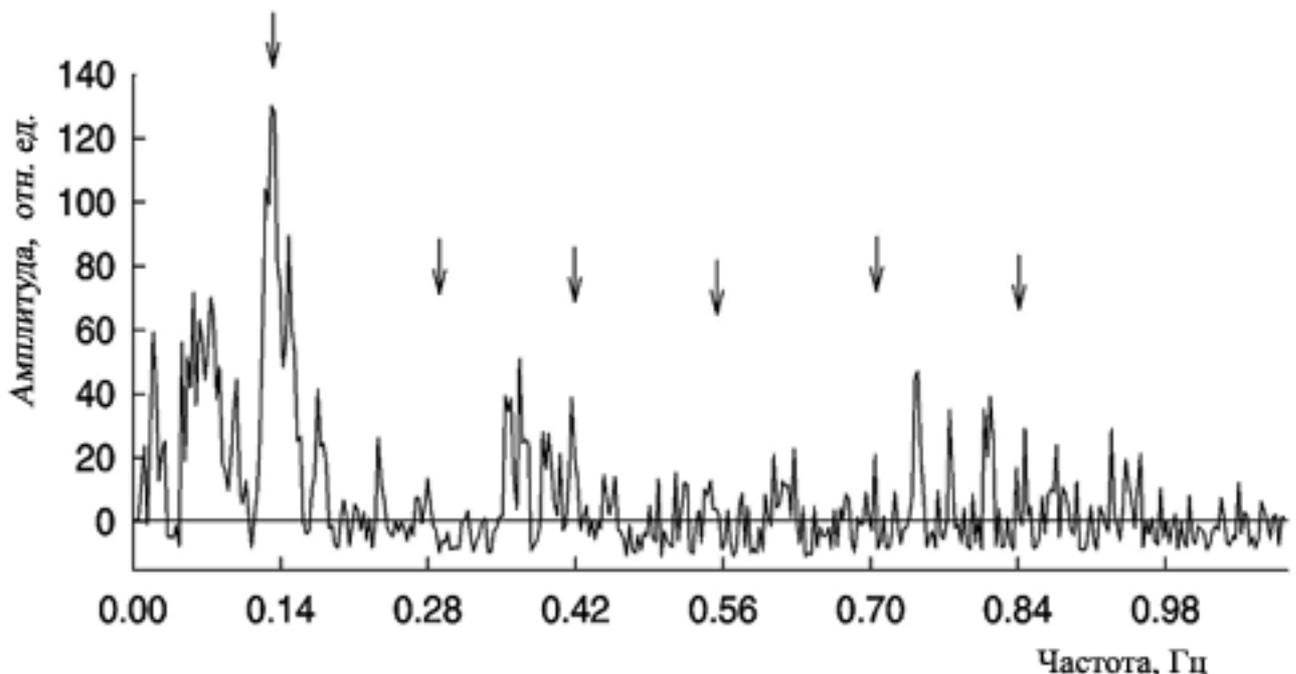


Рис. II.3. Пример амплитудного фурье-спектра АХР 1E 2259+586, полученного на частоте 111.2 МГц за 14.01.2003. Стрелками показаны фазы первых пяти фурье-гармоник.

объектов в центрах остатков вспышек сверхновых, АХР и SGR, источников с крутыми спектрами и т.д. Чувствительность поиска оценена по наблюдениям сильных и слабых известных пульсаров. Удалось получить несколько удачных спектров, два из них приведены в работе (Malofeev et al., 2004, Малофеев и др., 2005). У АХР 1E 2259+586 видна, в основном, широкая и сильная первая гармоника (Рис. II.3)

2.2.2 Средний профиль

Поскольку в отдельные дни наблюдений интегрирование проводилось только по 53 импульсам, то отношение сигнал/шум среднего импульса редко достигало 5 (примеры трех дней наблюдений приведены на рис. II.4.), в этом случае для улучшения отношения сигнал/шум мы суммировали разные дни наблюдений. Поскольку не было точного тайминга этого пульсара, то использовались дни, когда наблюдения проводились с двойным периодом, и привязка осуществлялась по одному из видимых импульсов. В этом случае в суммированном профиле у нас должно наблюдаться два импульса, разнесенных точно на период пульсара, как это показано на рис. II.5(а). После сложения этих двух импульсов с периодом пульсара (рис. II.5(б)) профиль получился очень узким, его средняя длительность равна 120 ± 20 мс или 1.7% от периода. Это один из самых узких импульсов относительно периода, наблюдающихся у радиопулсаров. Кроме того, в отличие от рентгеновского диапазона, в радиодиапазоне мы не наблюдаем интеримпульса с амплитудой $\geq 20\%$ от главного импульса. Нам удалось обнаружить импульсное периодическое излучение от этого пульсара также и на второй, более низкой частоте 87.5 МГц (рис. II.6.). Небольшое отношение сигнал/шум (~ 5) обусловлено малым числом накопленных периодов (80).

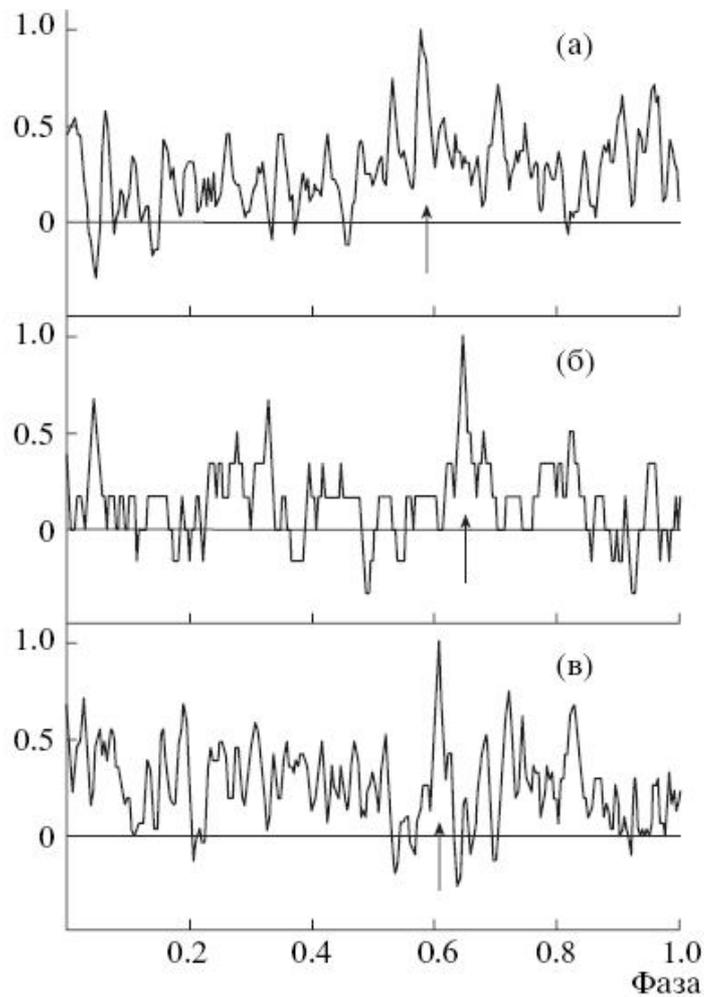


Рис. II.4. Примеры интегральных профилей (в отн. ед.) АХР 1E 2259+586, полученных на частоте 111.2 МГц суммированием 53 периодов 29.03.02 (а), 14 периодов 06.09.02 (б) и 53 периодов 11.01.03 (в). Стрелками показаны фазы прихода импульсов.

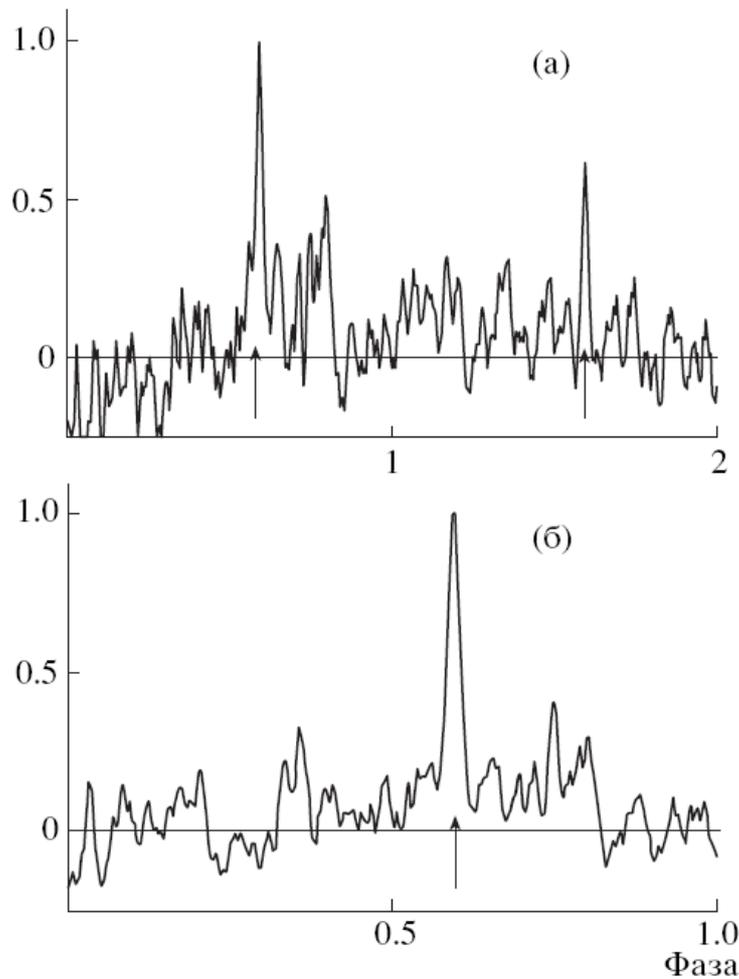


Рис. II.5. Интегральный профиль (в отн. ед.) АХР 1E 2259+586 на частоте 111.2 МГц, полученный суммированием 12 дней наблюдений и 312 двойных периодов вращения пульсара $P_H = 2P$, (а) и свертка с периодом вращения, т.е. сумма 624 периодов (б). Стрелками указаны фазы прихода импульсов.

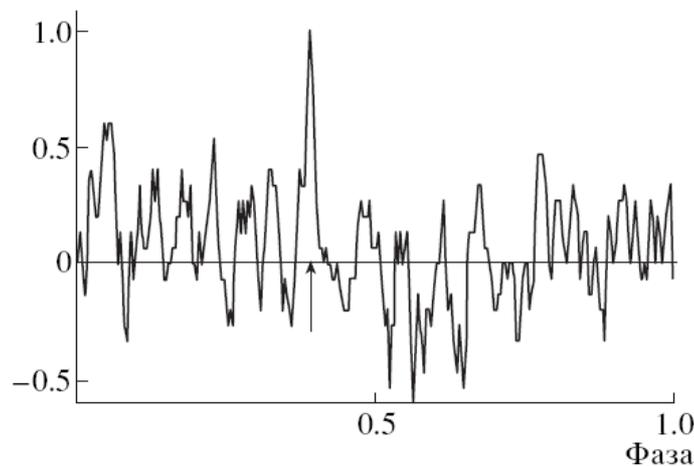


Рис. II.6. Пример интегрального профиля (в отн. ед.) АХР 1E 2259+586 на частоте 87.5 МГц, полученный 05.10.02 интегрированием 80 периодов. Стрелкой указана фаза прихода импульса.

2.2.3. Мера дисперсии

Радиоимпульсы, распространяясь в межзвездной среде, сильно зависят от частоты, на более высоких частотах импульс будет наблюдаться раньше, чем на более низких. Запаздывание радиоизлучения возникает из-за того, что показатель преломления плазмы для электромагнитных волн зависит от длины волны. Величина запаздывания:

$$\Delta t = \frac{e^2(\lambda_1^2 - \lambda_2^2)}{2\pi mc} DM, \quad (2.2)$$

где e , m – заряд и масса электрона, c – скорость света, λ – длина волны, DM (пк/см³) – мера дисперсии, показывает число свободных электронов на луче зрения (от объекта до наблюдателя) в столбике сечением 1 см²:

$$DM = \int_0^L N_e dl = \overline{N_e} L, \quad (2.3)$$

где N_e – концентрация электронов, dl – элемент длины вдоль луча зрения, $\overline{N_e}$ – среднее значение N_e , L – расстояние до источника. Таким образом, зная величину меры дисперсии, можно определить расстояние до пульсара независимым способом.

Оценка меры дисперсии DM была сделана по лучшим данным в диапазоне частот 111.24 – 110.60 МГц, который занимают 64 частотных канала. Она оказалась равной 79 ± 4 пк/см³ (Малофеев и др., 2005). Зависимость отношения сигнал/шум от меры дисперсии для 5 дней наблюдений показана на рис. II.7(а), а зависимость длительности импульса по уровню 0.5 амплитуды от DM – на рис. II.7(б). Из рис. II.7 видно, что наибольшее отношение сигнал/шум импульс имеет при $DM = 70-90$ пк/см³. Аналогичные зависимости наблюдаются и на частоте 87 МГц. К сожалению, нам не удалось пока получить надежные одновременные записи импульса пульсара на двух частотах 111 и 87 МГц, чтобы уточнить величину меры дисперсии.

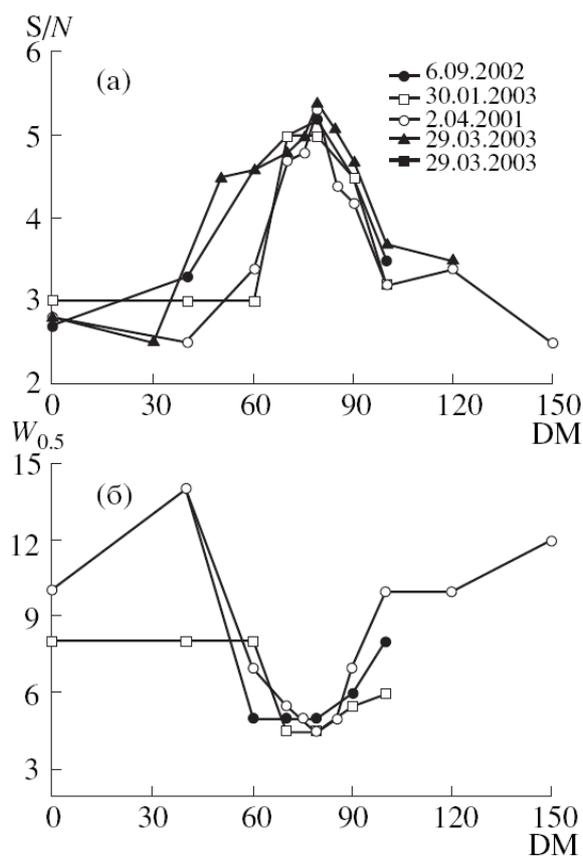


Рис. II.7. Отношение сигнал/шум для интегрального импульса в зависимости от меры дисперсии (а) и длительность импульса $w_{0.5}$ по уровню 0.5 от максимума (б) для АХР 1Е 2259+586

2.2.4. Плотность потока

Проведены измерения плотности потока относительным методом на частоте 111 МГц с калибровкой и привязкой к дискретным радиоисточникам с известной плотностью потока. Измерения потока для 1E2259+586 проведены в течение 30 дней в интервале 3.5 года. Средняя величина плотности потока с учетом наблюдений, в которых сигнал не превышал 4σ шумов, равна 35 ± 25 мЯн для 1E 2259+586 (Малофеев и др., 2005, Malofeev et al., 2006). Вместе со средней величиной приведена 1σ среднеквадратичного разброса плотности потока. На более низких частотах нам удалось оценить только верхнюю границу плотности потока для обоих пульсаров. Получено для 1E 2259+586 $S < 150$ мЯн на частоте 87МГц.

2.2.5. Период и производная периода

Для АХР 1E 2259+586 измеренный нами период и его производная в интервале MJD 51244–52749 (Malofeev et al., 2004) практически совпадают с несколько более точными значениями, полученными по измерениям в рентгеновском диапазоне в более раннюю эпоху MJD 50356 – 52016: $P = 6.978948446(4)$ с и $\dot{P} = 4.8430(8) \cdot 10^{-13}$ с/с (Gavriil & Kaspi, 2002). Измерения периода и его производной приведены к одной юлианской дате MJD 51995.5827.

2.2.6. Расстояние и светимость

Имеющиеся в литературе оценки расстояния до пульсара 1E 2259+586, а скорее до остатка вспышки сверхновой СТВ-109, почти в центре которой лежит пульсар, находятся в диапазоне 3.5 – 4.5 кпк (см., например, (Gregory & Fahlman, 1980; Haughes et al., 1984)). Наши измерения меры дисперсии 79 ± 4 пк см⁻³ в рамках новой модели распределения электронной плотности в Галактике (Taylor & Cordes, 1993, Cordes & Lazio, 2002, 2003) дают расстояние 3.6 ± 0.7 кпк (Малофеев и др., 2005). Интересно отметить, что уже в первой работе по обнаружению рентгеновского источника (Gregory & Fahlman, 1980) в направлении остатка вспышки сверхновой СТВ-109 авторы дали такую же оценку расстояния до остатка (3.6 ± 0.4) кпк на основе зависимости “поверхностная яркость – угловой размер” на частоте 408 МГц.

Светимость в рентгеновском диапазоне 1E 2259+586 на расстоянии 3.6 кпк ($\lg L_x = 34.9$ эрг/с (Малов и др., 2003)) остается на три порядка больше, чем потеря кинетической энергии вращения этой звезды. Потеря кинетической энергии у этой нейтронной звезды при $P = 6.979$ с и $\dot{P} = 4.8 \cdot 10^{-13}$ с/с будет равна $\dot{E} = 5.6 \cdot 10^{31}$ эрг/с. Здесь \dot{E} определяется как

$$\dot{E} = \frac{4\pi^2 I \dot{P}}{P^3}, \quad (\text{II.1})$$

где I – момент инерции нейтронной звезды, принятый равным 10^{45} г·см². Для того, чтобы оценить интегральную радиосветимость, мы должны знать спектр пульсара или, хотя бы, величину спектрального индекса. Затем мы используем формулу из работы (Малов и др., 1994):

$$L_R = \frac{\pi^3 l^3}{P} \int_0^\infty S(\nu) \omega(\nu) d\nu, \quad (\text{II.2})$$

где l – расстояние до пульсара, $S(\nu)$ – плотность потока в импульсе на частоте ν , а $\omega_{0,5}(\nu)$ – длительность импульса, которая принимается за константу. Мы провели оценку спектрального индекса для 1E 2259+586, используя наше измерение плотности потока на частоте 111 МГц $S_{111} = 35$ мЯн и верхнюю оценку потока на 600 МГц $S_{600} < 2.3$ мЯн (Lorimer et al., 1998) и 1500 МГц $S_{1500} < 0.05$ мЯн (Coe et al., 1994), и получили, что $\alpha > 2.5$. Приняв во внимание, что спектр скорее всего крутой, и положив $\alpha = 2.5$, мы вычислили интегральную радиосветимость $L_R = 3 \cdot 10^{28}$ эрг/с (Малофеев и др., 2005, Malofeev et al., 2006). Таким образом, в радиодиапазоне этот пульсар демонстрирует среднее значение светимости, если смотреть на распределение светимостей в работе (Малов и др., 1994).

2.2.7. Динамические спектры

Наблюдения с помощью нового цифрового приемника начали проводить с конца 2006 г. на частоте 111 МГц (БСА ФИАН), и с конца 2009 г. на 62 МГц (ДКР-1000 полотно Восток-Запад). Всего было обработано более 60 сеансов наблюдений на частоте 111 МГц и около 10 сеансов на 62 МГц за период с ноябрь 2006 г. по сентябрь 2010 г.

Для демонстрации работы нового приемника на рис. II.8. приводятся примеры наблюдения сильного пульсара В1133+16 со средней плотностью потока $S \sim 1000$ мЯн на частоте 111 МГц и слабого пульсара В2310+42 с плотностью потока $S \sim 110$ мЯн на той же частоте. Для АХР 1E 2259+586 плотность потока меньше, чем у В2310+42, в два-три раза, но тем ни менее

удалось выделить слабый сигнал на двух частотах по методике, описанной в §1.2 (рис. П.9 и рис. П.10) путем суммирования нескольких сеансов наблюдений. Для суммирования отбирались дни наблюдений с близкой фазой импульса и с отношением сигнал/шум выше 4. В результате получили узкий профиль импульса на частоте 111 МГц, и чуть более широкий на частоте 62 МГц. Наблюдения на частоте 62 МГц были сильно искажены помехами (рис. П.10). Видимые помехи были вычищены вручную.

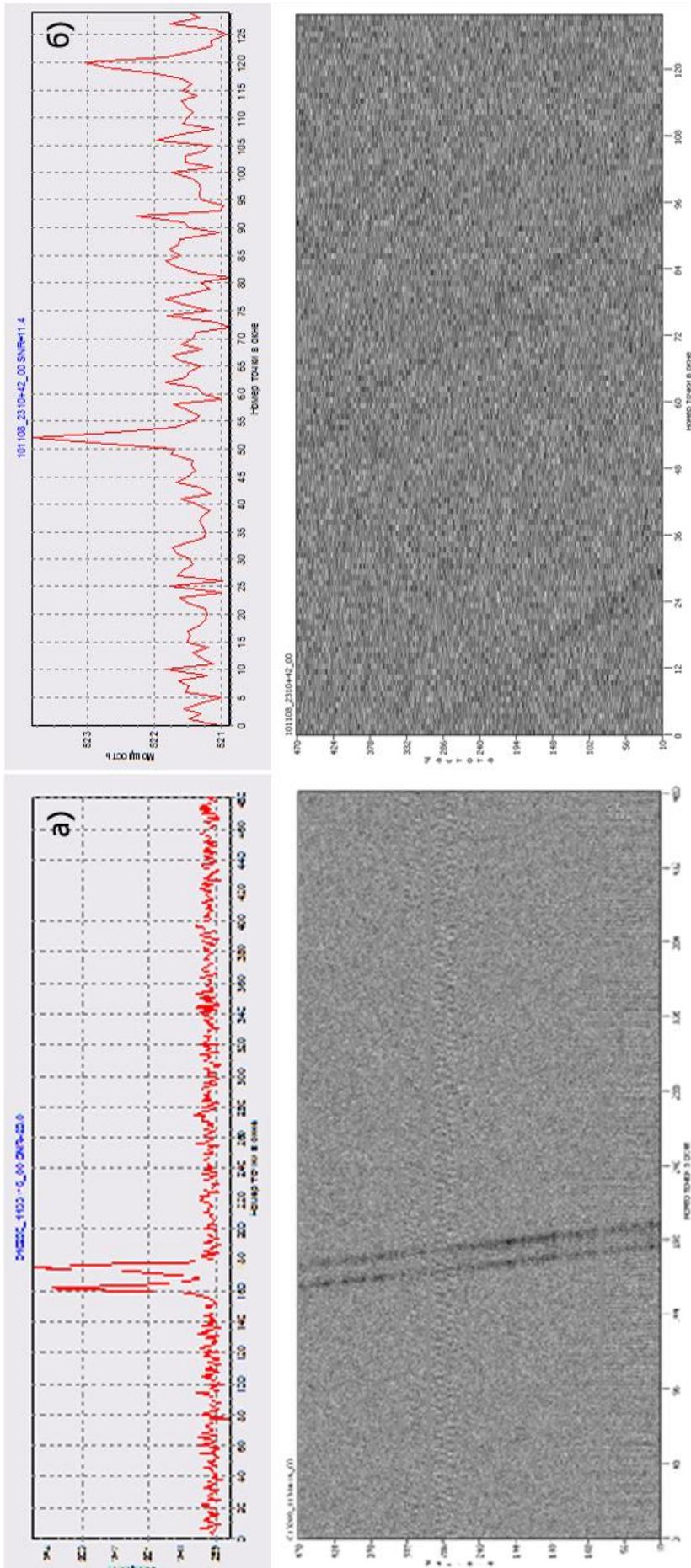


Рис. 11.8. а) Интегральный профиль импульса V1133+16 на ИИМГц (в отн. ед.), полученный суммированием 482 периодов (вверху) и динамический спектр (внизу); **б)** Интегральный профиль импульса V2310+42 на ИИМГц (в отн. ед.), полученный суммированием 375 двойных периодов (вверху) и динамический спектр (внизу).

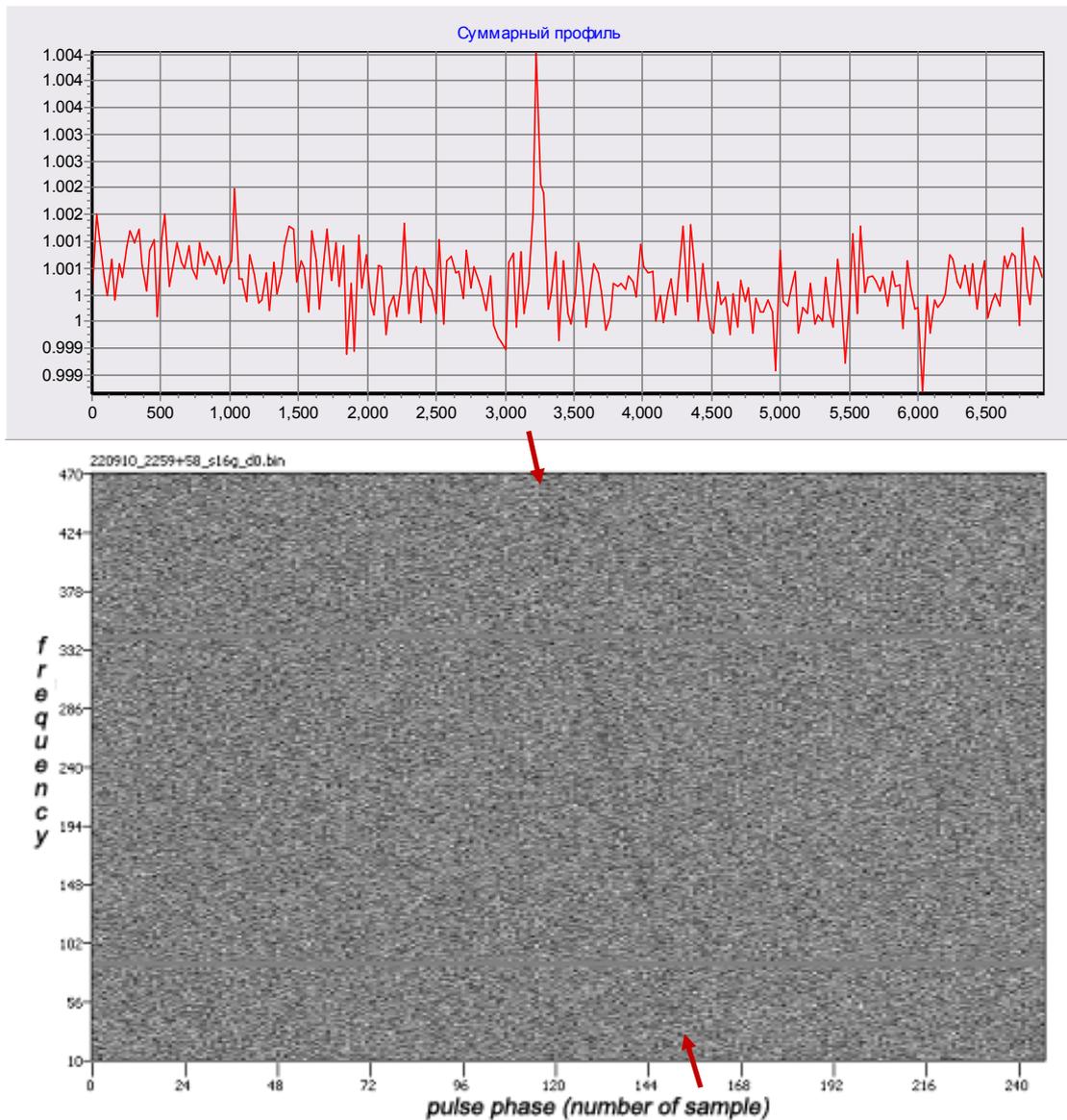


Рис. II.9. Интегральный профиль импульса AXP 1E 2259+586 на 111 МГц (в отн. ед.), полученный путем суммирования 4 дней наблюдений или 72 импульсов (вверху) и динамический спектр (внизу).

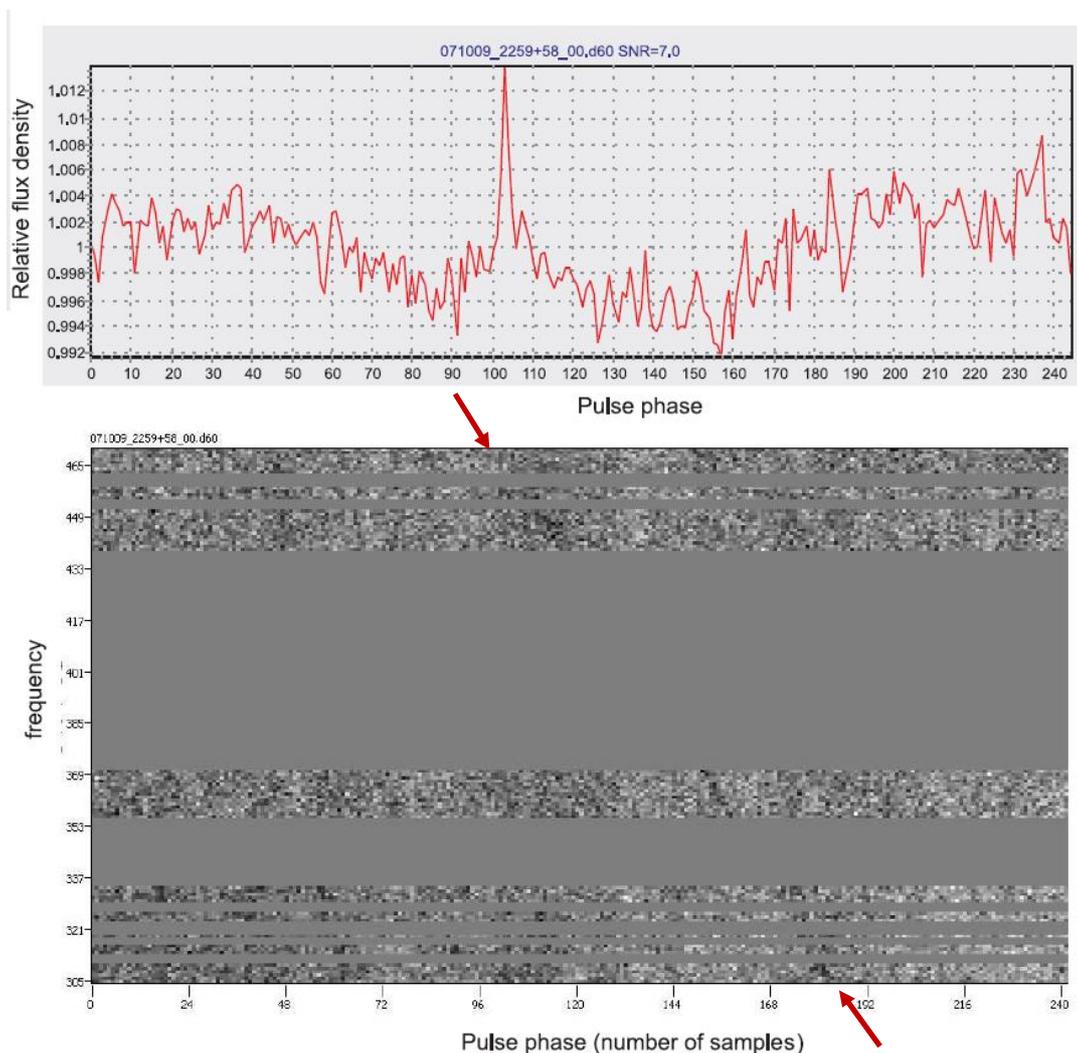


Рис. II.10. Интегральный профиль импульса AXP 1E 2259+586 на 111 МГц (в отн. ед.), полученный путем суммирования 4 дней наблюдений или 72 импульсов (вверху) и динамический спектр (внизу).

2.2.8. Сравнение с рентгеновскими данными

Сравнение данных в радио- и рентгеновском диапазонах показывает сильное различие в нескольких наблюдаемых параметрах. Во-первых, это длительность импульса, которая различается в 16 раз: 1.7% от длительности периода по уровню 0.5 амплитуды импульса для 1E 2259+586 в радионаблюдениях, в то время как в рентгеновском профиле длительность импульса составляет $\sim 27\%$ от периода (Рис. II.11). Во-вторых, у 1E 2259+586 интеримпульс имеется только в рентгеновском диапазоне. Кроме того, очень существенным является огромная разница в величинах

радио и рентгеновской светимости. Так же в радиодиапазоне наблюдается очень сильные вариации плотности потока.

Оценки значения магнитного поля (B) и характеристический возраст (T) вычислялись в рамках модели магнито-дипольного излучения (см. Манчестер и Тейлор, 1980):

$$B = \sqrt{\frac{3c^3 I P \dot{P}}{2\pi^2 R^3}} = 6,4 \cdot 10^{19} \sqrt{P \dot{P}}, \quad (\text{II.3})$$

где R – радиус нейтронной звезды, принятый равным 10^6 см,

$$T = \frac{P}{(n-1)\dot{P}} \left(1 - \frac{P_0}{P} \right), \quad (\text{II.4})$$

где P_0 – начальный период вращения пульсара, а n – индекс торможения. При

$P_0 \ll P$ и $n = 3$ получим $T = P / 2\dot{P}$.

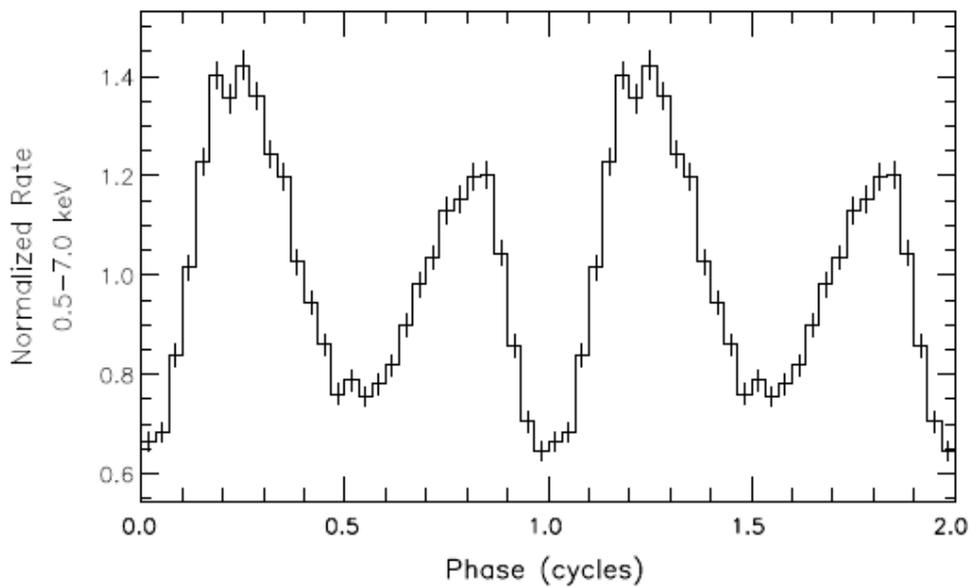


Рис. II.11. Профиль импульса АХР 1Е 2259+586 в рентгеновском диапазоне (0,5 – 7,0 кэВ) (из работы Patel et al., 2001)

§ 2.3. Наблюдения АХР 4U 0142+61

Наблюдения АХР 4U 0142+61 были начаты в марте 1999 г. на высокочувствительном радиотелескопе БСА ФИАН на частоте 111 МГц. Несколько наблюдений были проведены на частоте 40 МГц на телескопе ДКР-1000, полотно Восток-Запад. Так же как и для предыдущего пульсара, чтобы увеличить надежность обнаружения, большинство наблюдений проведено с двойным периодом. Некоторые наблюдения были проведены с калибровкой плотности потока с использованием калибровочных радиоисточников.

2.3.1. Средний профиль

В сумме обработано около 400 дней наблюдений на 111 МГц и более 20 дней на 40 МГц за весь наблюдательный интервал (март 1999 – сентябрь 2010). В результате тщательного анализа данных наблюдений было обнаружено слабое периодическое импульсное радиоизлучение от АХР 4U 0142+61 на частотах 111 и 40 МГц. Импульсный сигнал превышал 4σ только в 20% от всех дней наблюдений на частоте 111 МГц. Примерно одна пятая всех наблюдений была искажена помехами. Поскольку суммирование в один день наблюдений проводилось только по 46 импульсам, то отношение сигнал/шум накопленного импульса редко достигало пяти. Соответственно, для улучшения отношения сигнал/шум, мы проводили суммирование данных в течение нескольких близких дней наблюдений. Так как этот пульсар показывает большие отклонения времен прихода в рентгеновских наблюдениях, до 0.3 от периода (Dib et al., 2007), то суммировались те дни, когда мы видели импульс с отношением сигнал/шум больше чем четыре. Большинство наблюдений были выполнены с двойным периодом, и привязка осуществлялась по одному из видимых импульсов. Тогда в суммарном

профиле должны быть видны два импульса, разделенных точно на один период пульсара, как показано на рис. П.12(а). Сложение этих двух импульсов с периодом пульсара (Рис. П.12(б)) дает достаточно узкий интегральный профиль с длительностью 150 ± 30 мс или 1,7% периода, что сильно отличается от рентгеновских данных, где профиль импульса составляет $\sim 35\%$. В то же время изредка наблюдался очень широкий профиль импульса (Рис. П.13). Форма среднего профиля в радиодиапазоне, возможно, состоит из нескольких компонентов, или имеет главный

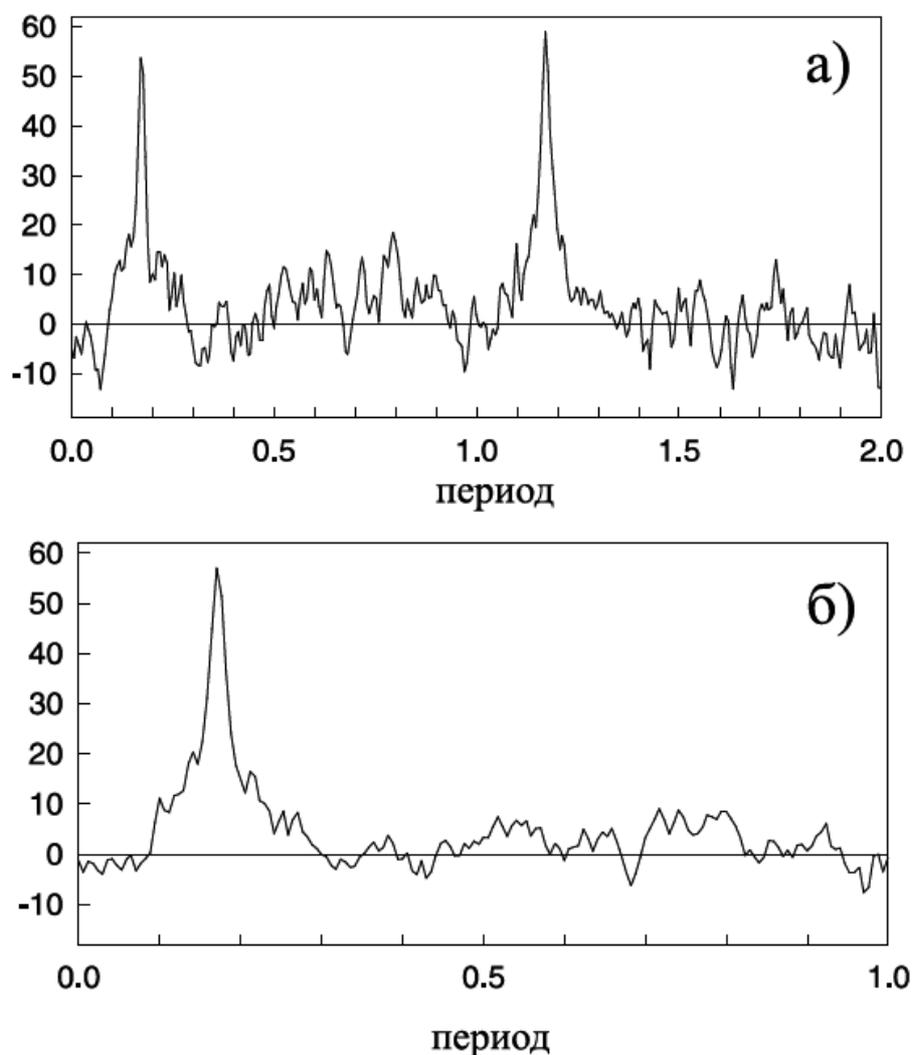


Рис.П.12. Интегральный профиль (в отн. ед.) АХР 4U0142+61 на 111 МГц, полученный суммированием 24 дней наблюдений или 449 двойных периодов вращения пульсара (а) и свертка с периодом вращения, т.е. сумма 898 периодов (б).

компонент и подложку (Рис. II.12). Мы также обнаружили импульсное периодическое излучение от этого пульсара на частоте 40.96 МГц (Рис. II.14). Здесь наблюдается более широкий средний профиль и возможный слабый интерпульс на половине периода. Данные на 40 МГц требуют дальнейшего подтверждения.

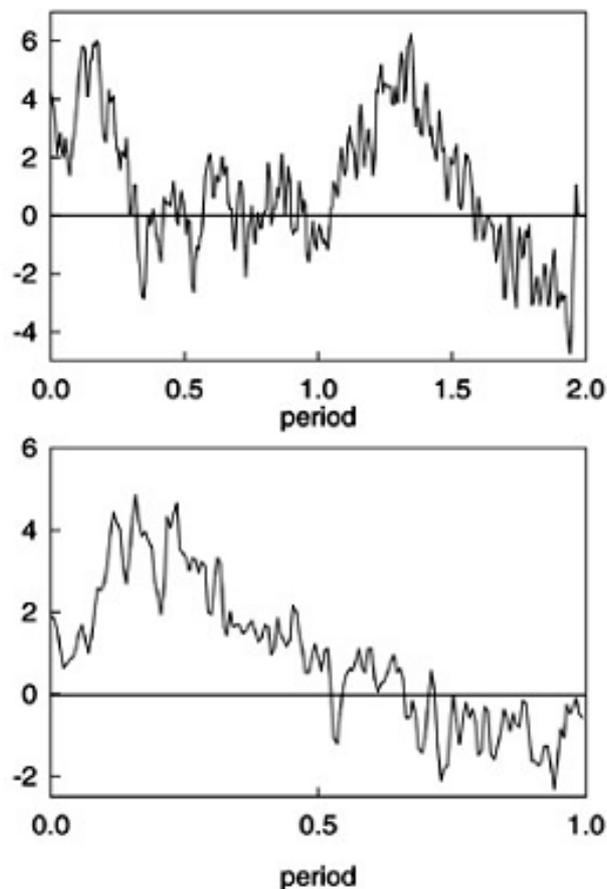


Рис. II.13. Пример интегрального профиля (в отн. ед.) АХР 4U 0142+61, на 111 МГц за 16.08.2004, полученный суммированием 22 двойных периодов (вверху), и свертка с периодом вращения, т.е. сумма 44 периодов (внизу)

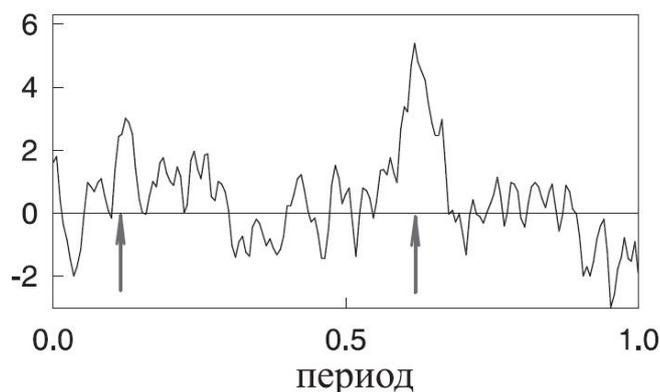


Рис. II.14. Пример интегрального профиля АХР 4U 0142+61 на частоте 40.96 МГц, суммировано 3 дня наблюдений или 408 периодов вращения пульсара. Стрелками указаны фаза прихода главного импульса и фаза, отстоящая на 0,5 периода.

2.3.2. Мера дисперсии и расстояние

Определение меры дисперсии дает возможность получить независимую оценку расстояния до пульсара. Мы оценили эту величину, используя два частотных интервала у многоканального приемника: 111.22 - 109.94 МГц и 40.96 - 40.32 МГц, которые занимают 64 и 32 канала. Зависимости отношения сигнал/шум и длительности импульса от меры дисперсии для трех дней наблюдений показаны на рис. II.15. Из рисунка видно, что средний профиль имеет самое высокое отношение сигнал/шум при $DM = 27 \pm 5$ пк/см³ (Табл. II.2). Оценки расстояния для АХР 4U 0142+61, встречающиеся в литературе, лежат в интервале 1 – 5 кпк. Наши измерения меры дисперсии, 27 ± 5 пк/см³ (Малофеев и др., 2010), приводят к расстоянию 1.4 ± 0.3 кпк для модели распределения электронной плотности в Галактике Тейлора и Кордса (Taylor & Cordes, 1993, Cordes & Lazio, 2002, 2003).

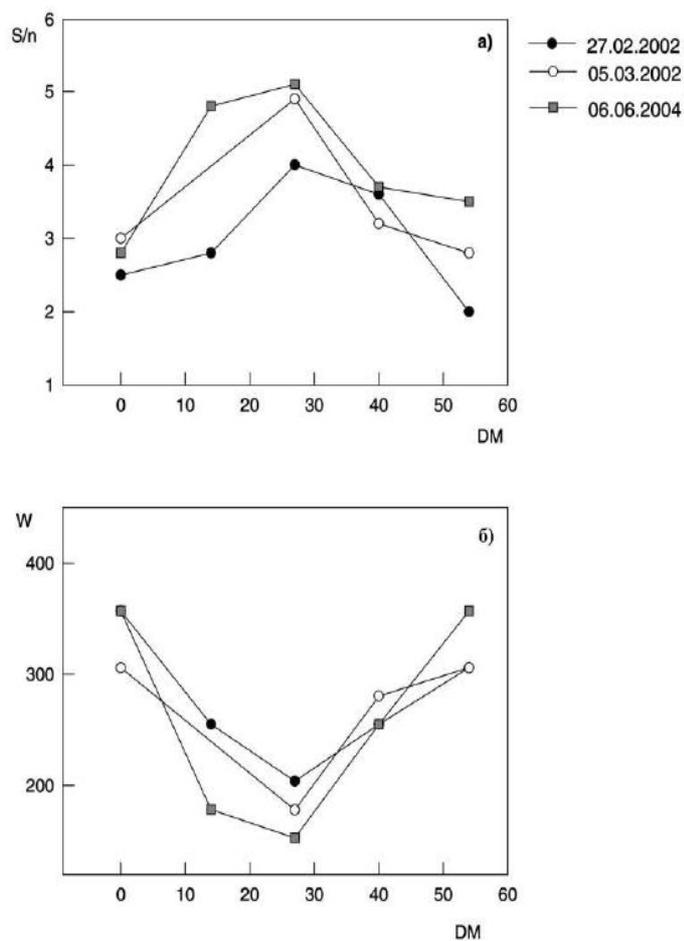


Рис. 11.15. Две зависимости от величины меры дисперсии для АХР 4U 0142+61: отношение сигнал/шум для интегрального импульса (а) и длительность импульса (в мс) по уровню 0,5 от максимума (б)

2.3.3. Плотность потока и радиосветимость

Измерения плотности потока проведены относительным методом на частоте 111 МГц с калибровкой и привязкой к дискретным радиоисточникам с известной плотностью потока. Для АХР 4U 0142+61 оценка плотности потока получена по 15 дням наблюдений, когда был виден сигнал с амплитудой больше 4σ шумов. У данного пульсара наблюдаются большие флуктуации плотности потока, как день ото дня, что проявляется в

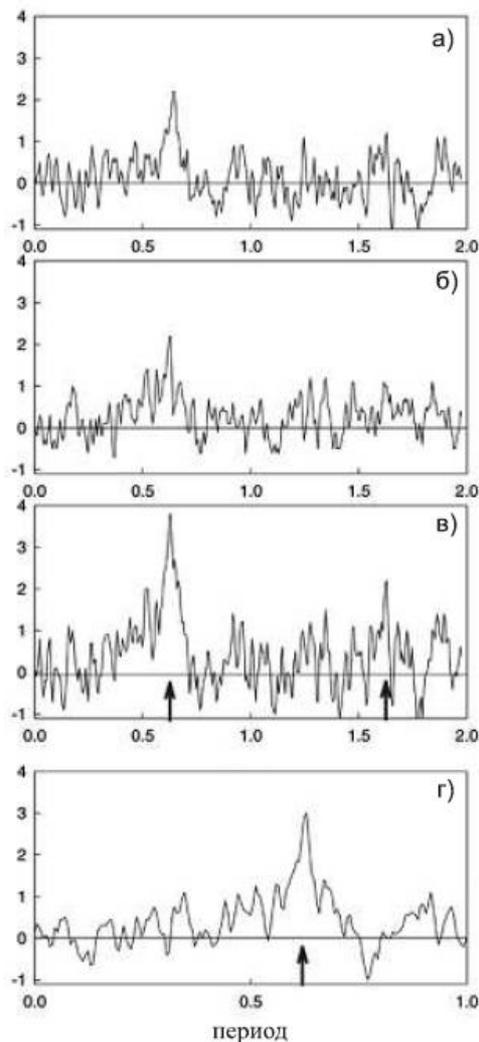


Рис. II.16. Примеры интегральных профилей, полученные 18.07.2006 на частоте 111 МГц путем суммирования 3 групп двойных периодов вращения пульсара (а) и других 4 групп двойных периодов (б). (в) – сложение этих групп, т.е. сумма 7 двойных периодов вращения пульсара (стрелками показаны фазы прихода импульсов), и свертка с одним периодом, т.е. сумма 14 импульсов (г).

небольшом количестве наблюдений с обнаружением сигнала (20% от всех дней наблюдений), так и на коротких временных масштабах, когда наблюдаются сильные индивидуальные импульсы внутри одного сеанса наблюдения (Рис. II.16) (Малофеев и др., 2010). Возможно, в случае AXPс 1E 2259+586 и 4U 0142+61 мы имеем ситуацию похожую на новый класс пульсаров – RRATs (McLaughlin et al., 2006), которые демонстрируют очень редкие радиоимпульсы, или на PSR 0656+14, который показывает сильные собственные изменения плотности потока (Weltevrede et al., 2006). Для получения полной радиосветимости (Табл. II.2) была проведена оценка спектрального индекса, используя измерение плотности потока на 111 МГц и верхние пределы на 1400 МГц: $S_{1400} < 0,3$ мЯн (Gensler et al., 2001) и $S_{1380} < 0,046$ мЯн (den Hartog et al., 2007). Полученный спектральный индекс $\alpha > 2,7$ (Малофеев и др., 2010).

2.3.4. Период и производная периода

Период и производная периода были вычислены с использованием 13 групп наблюдательных данных за промежуток времени декабрь 2003 – июль 2005 (Малофеев и др., 2010). Сравнение с недавно опубликованными данными 10-летнего RXTE-мониторинга в рентгеновском диапазоне (Dib et al., 2007) показывает, что частота вращения пульсара, измеренная нами для отрезка в 1.5 года, несколько отличается для общей эпохи MJD = 51704. Это различие может быть объяснено долговременными вариациями частоты вращения между концом 2003 и началом 2005 гг., которые также имеют место в рентгеновских данных (Dib et al., 2007).

2.3.5. Динамический спектр

Для получения динамических спектров за период с ноябрь 2006 г. по сентябрь 2010 г. было проведено около 60 сеансов наблюдений на частоте 111 МГц с помощью нового цифрового приемника (Логвиненко, 2006). Удалось обнаружить слабое импульсное периодическое диспергирующее радиоизлучение (рис.П.17) (Малофеев и др., 2011).

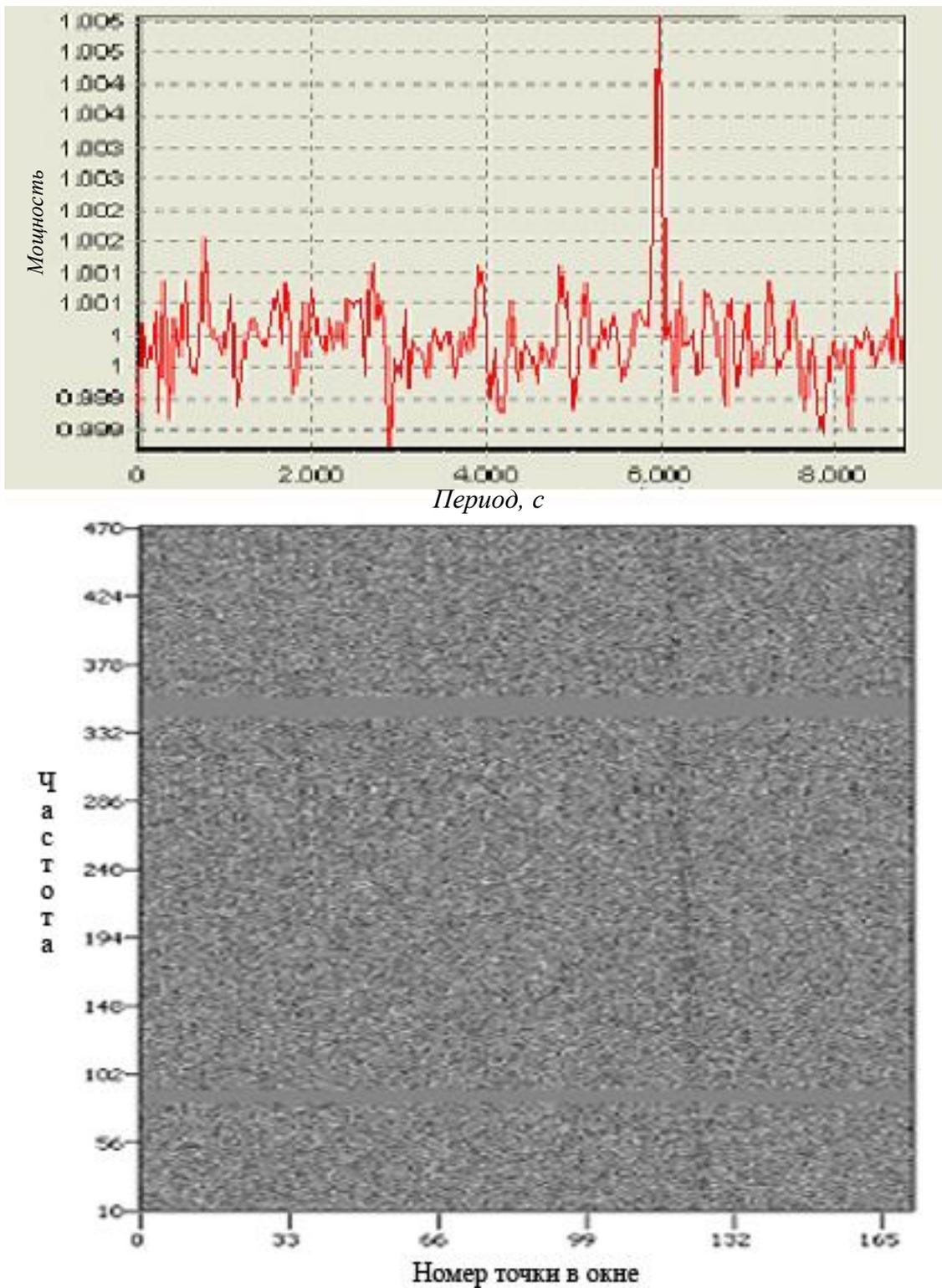


Рис.11.17. Интегральный профиль импульса AXP 4U 0142+61 на 111 МГц (в отн. ед.), полученный путем суммирования 3 дней наблюдений или 37 импульсов (вверху) и динамический спектр (внизу).

2.3.6. Сравнение с рентгеновскими данными

Сравнение с рентгеновскими данными показывает значительные различия по двум наблюдаемым параметрам. Во-первых, длительность импульса в радио и рентгене для АХР 4U 0142+61 отличаются в 20 раз: длительность по уровню 0.5 амплитуды импульса в радиодиапазоне составляет 2,6% от периода, а в рентгеновском диапазоне – 34% (рис. II.18). Во-вторых, наличие сильных вариаций плотности потока в радиоданных на временных шкалах: от десятков секунд до дней (Малофеев и др., 2010).

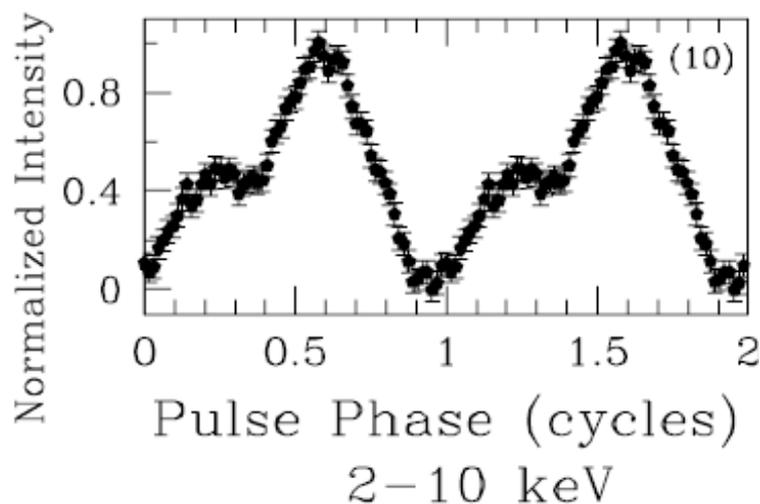


Рис. II.18. Средний профиль импульса АХР 4U 0142+61 в рентгеновском диапазоне (2 – 10 кэВ) (из работы Dib et al., 2006)

Табл. II.2. Измеренные и вычисленные параметры двух АХР

	<i>1E 2259+586</i>	<i>4U 0142+61</i>
<i>P (с)</i>	6.97894846 (6)	8.68832935(6)
<i>\dot{P} (10^{-13} с/с)</i>	4.87 (2)	18.713(4)
<i>Эпоха наблюдений (MJD)</i>	512444 – 52749	53100 – 54150
<i>Эпоха (MJD)</i>	51995.5827	51704
<i>DM (см⁻³ пк)</i>	79(4)	27(4)
<i>D (кпк)</i>	3.6(0.2)	1.4(0.3)
<i>S (мЯн)</i>	35(25)	30(20)
<i>$\omega_{0.5}$ (111МГц) (мс)</i>	120(20)	150(20)
<i>L_R (эрг/см)</i>	$3 \cdot 10^{28}$	$1.5 \cdot 10^{27}$
<i>B (Гс)</i>	$1.2 \cdot 10^{14}$	$2.6 \cdot 10^{14}$
<i>T (год)</i>	$2.2 \cdot 10^5$	$0.74 \cdot 10^5$

§ 2.4. Наблюдения АХР ХТЕ J1810-197

Аномальный рентгеновский пульсар ХТЕ J1810-197 тщательно исследовался в радиодиапазоне на частотах 0.69 — 144 ГГц (Camilo et al., 2006, 2007b,c,d, Kramer et al., 2007, Lazaridis et al., 2008). От большинства радиопульсаров этот объект отличается плоским спектром в широком диапазоне частот. Наблюдаются значительные вариации спектрального индекса ($-0.67 < \alpha < 1.2$), если $S \sim \nu^\alpha$, так же существует различие в спектрах главного импульса и интеримпульса, в тех случаях, когда наблюдаются оба сигнала (Lazaridis et al., 2008). Этот объект демонстрирует значительные

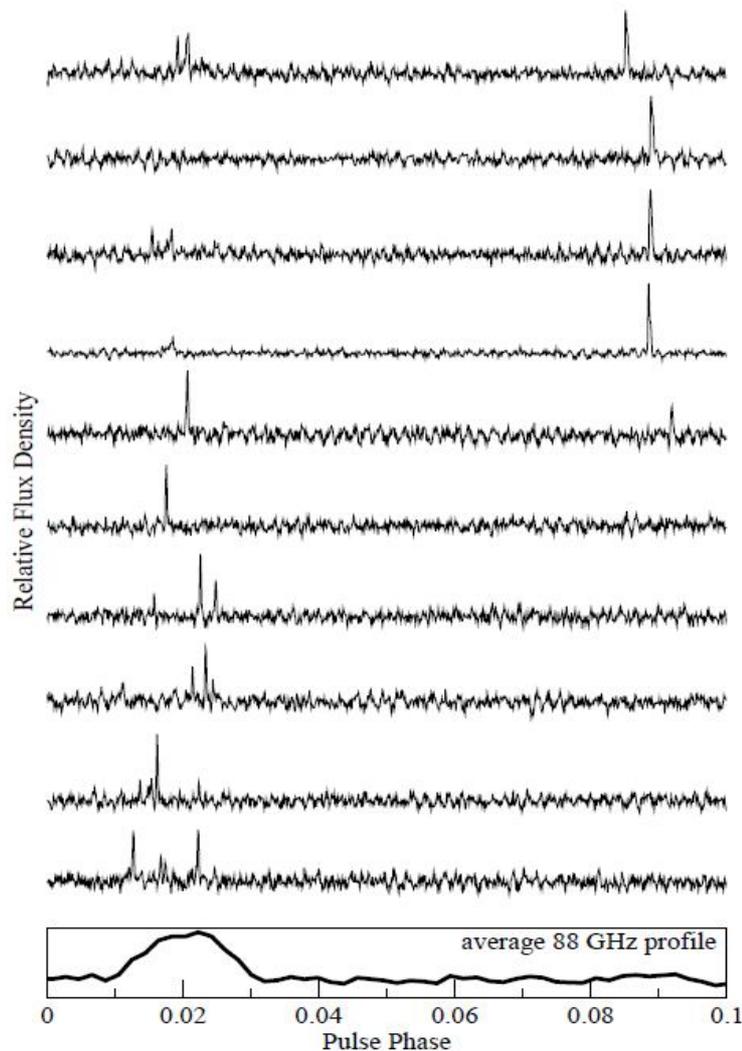


Рис. 11.19. Профили 10 индивидуальных импульсов ХТЕ J1810-197 на частоте 88 ГГц и суммарный профиль (нижняя панель). (из работы Camilo et al., 2007c)

флуктуации в значениях плотности потока, форме профиля импульса и фазе прихода импульсов (рис. II.19). Эти изменения происходят на разных временных масштабах, от импульса к импульсу, изо дня в день, а так же в течении недели или месяца. Поэтому в отличии от «нормальных» пульсаров накопление нескольких сотен импульсов не дает стабильную среднюю форму импульса. Излучение от ХТЕ J1810-197 сильно поляризовано (80-95%), в основном это линейно поляризованное излучение, но со значительной степенью круговой поляризации на всех наблюдаемых частотах (Kramer et

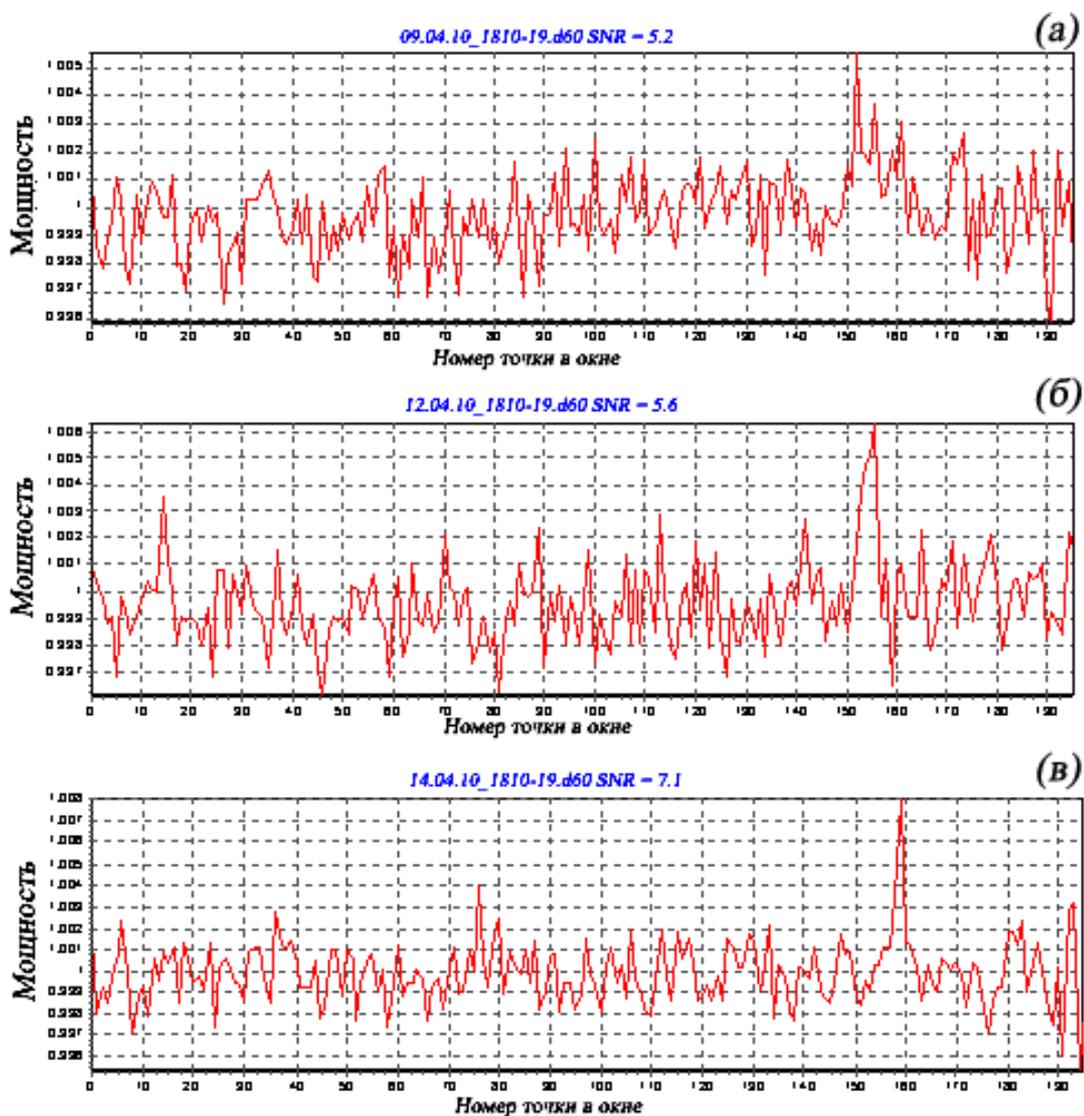


Рис. II.20. Интегральные профили импульса ХТЕ J1810-197 на частоте 62 МГц. Наблюдения 9.04.10 (а), 12.04.10 (б) и 14.04.10 (в).

al., 2007; Camilo et al., 2007b).

Наблюдения ХТЕ J1810-197 на радиотелескопах ПРАО начали проводиться с 2008 г. после его обнаружения в радиодиапазоне (Camilo et al., 2006). Проведено около 20 наблюдений на частотах 62 и 42 МГц. Нам удалось зарегистрировать периодическое импульсное излучение от этого объекта на частоте 62 МГц примерно в половине наблюдений (Малофеев и др., 2011). На рис. П.20 приведены профили импульса за три дня наблюдений: 9, 12 и 14 апреля 2010 г., а на рис. П.21 показан суммарный профиль, полученный суммированием трех дней наблюдений с небольшим

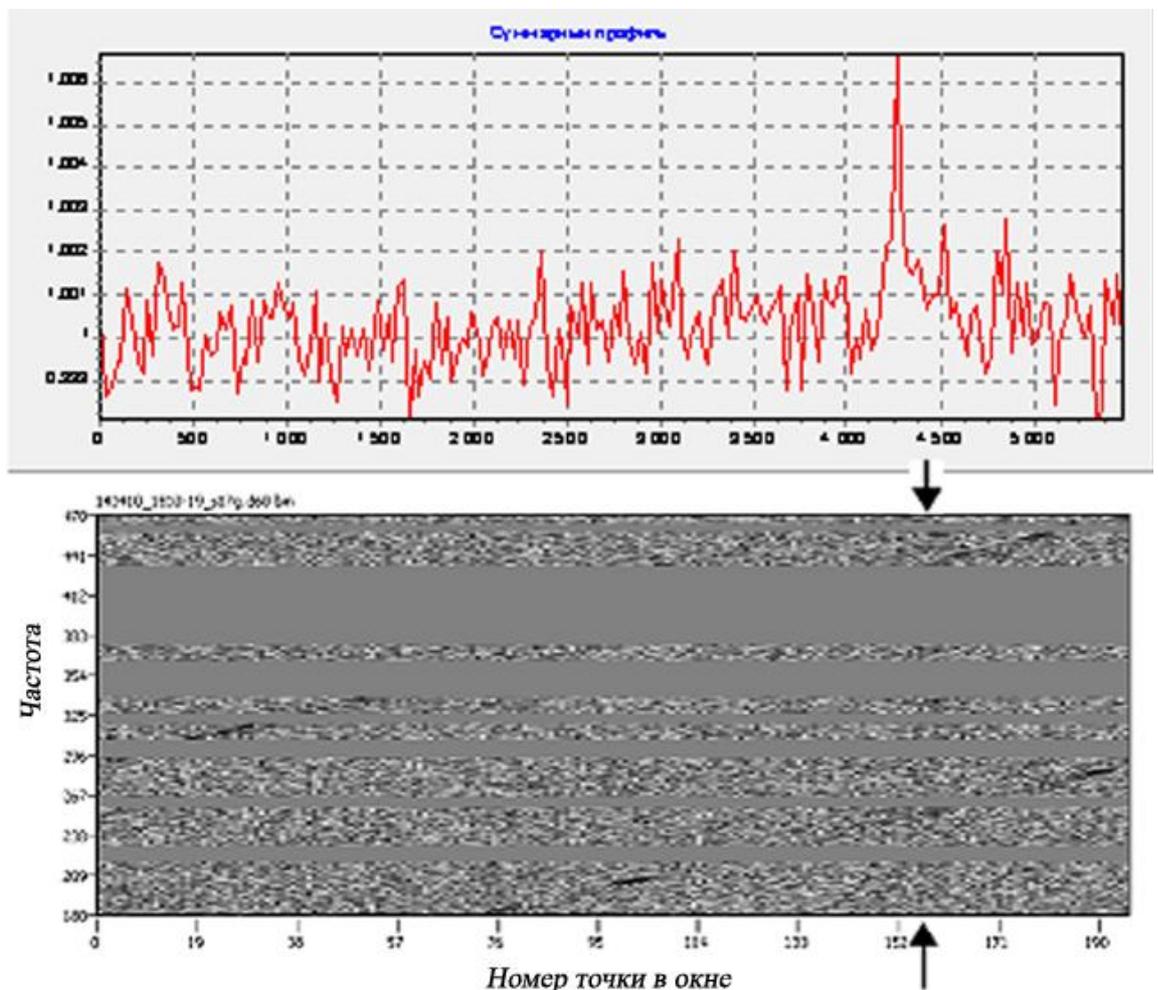


Рис. П.21. Интегральный профиль импульса ХТЕ J1810-197 на частоте 62 МГц, полученный суммированием трех дней наблюдений или 51 периода (вверху), и динамический спектр, построенный с учетом меры дисперсии (внизу). Вертикальный трек обозначен стрелочками.

смещением (на 1-3 отсчета) по фазе, а также динамический спектр, полученный с учетом меры дисперсии $DM = 178 \text{ пк/см}^3$. Вертикальный трек от истинного сигнала со слабой амплитудой обозначен стрелочками, наклонные треки справа налево дает аппаратурный сигнал с нулевой мерой дисперсии, который появляется в конце периода, при наблюдении одновременно с аналоговым приемником.

На частоте 62 МГц, как и на более высоких частотах, этот пульсар так же демонстрирует нестабильность формы профиля, фазы прихода импульса (Рис. П.20 и П.22) и плотности потока. Примерно в 20% дней на частоте 62 МГц наблюдается интеримпульс, предшествующий главному на расстоянии ~ 0.33 периода, что согласуется с измерениями на высоких частотах (Camilo et al., 2006, Lazaridis et al., 2008). Было сделано 9 измерений плотности потока S , которая оказалась в интервале $(400 \div 3500)$ мЯн, со средним значением $\langle S \rangle = 1100$ мЯн (Малофеев и др., 2010). Оценки спектрального индекса были получены с использованием значений плотности потока на 1400 МГц, данными разными авторами: $\alpha_{(111-1400)} = -0.4$ (Camilo et al., 2007d) и $\alpha_{(111-1400)} = -2.2$ (Lazaridis et al., 2008).

Такая существенная нестабильность основных параметров радиоизлучения на всех частотах несвойственна обычным радиопульсарам, и, в основном, связана с самим механизмом радиоизлучения нейтронной звезды, и лишь в некоторых случаях это следствие влияния межзвездной среды. Такое поведение пульсара значительно усложняет понимание его механизма излучения и выделяет эти объекты из всего класса радиопульсаров.

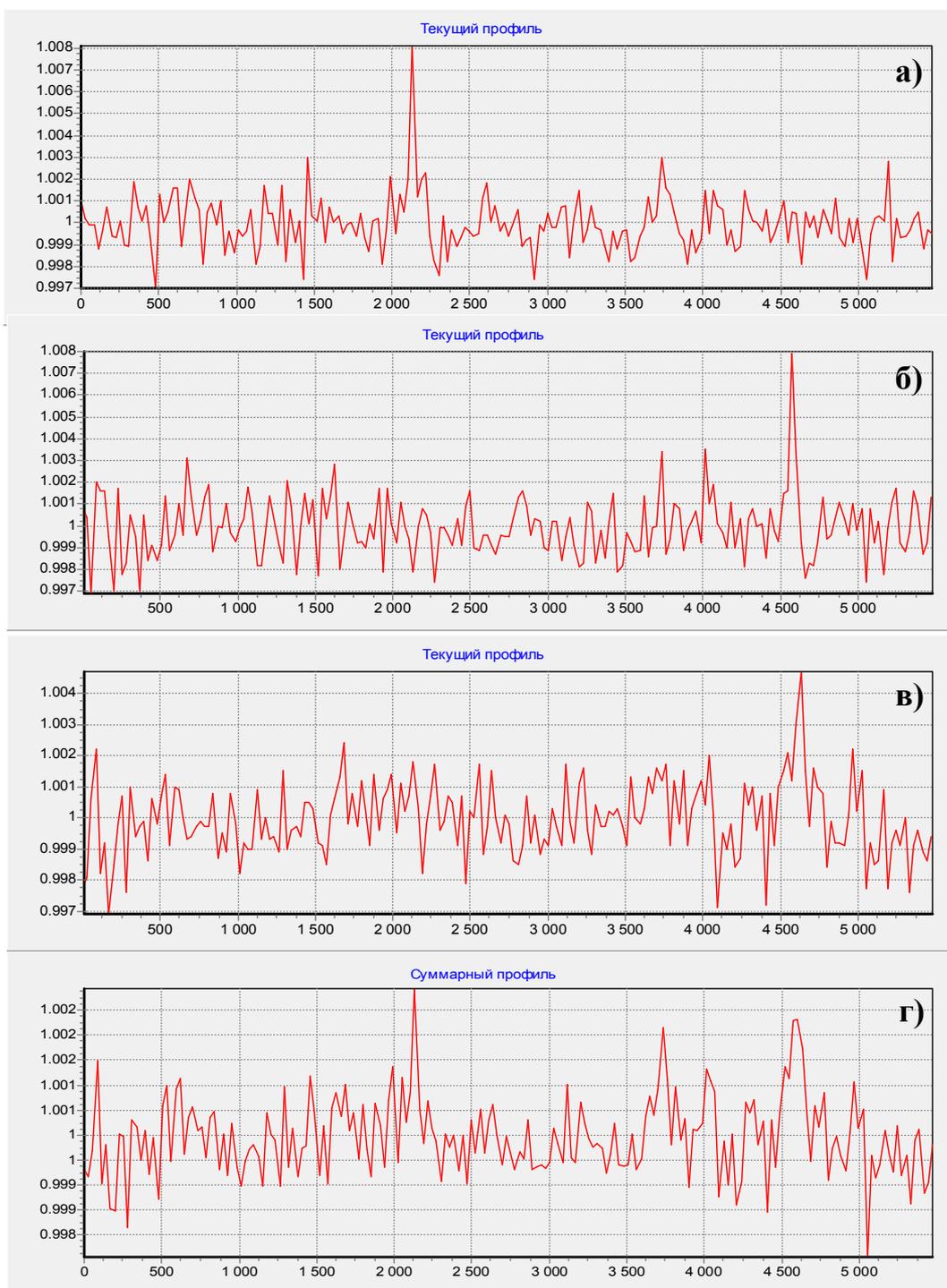


Рис. II.22. Профили импульса пульсара XTE J1810-197 на частоте 62 МГц. (а) – наблюдения 08.06.10, сумма 17 импульсов; (б) – 09.06.10, сумма 19 импульсов; (в) – 10.06.10, сумма 22 импульсов; (г) – профиль импульса получен суммированием 3 дней наблюдений или 58 импульсов.

Выводы к Главе II

Обнаружено слабое импульсное радиоизлучение от двух аномальных рентгеновских пульсаров 1E 2259+586 и 4U 0142+61 на трех низких частотах. В Табл. II.2 перечисляются основные параметры радиоизлучения для двух объектов. Главное различие между радио- и рентгеновским излучением в том, что интегральный профиль в радиодиапазоне является существенно более узким. Получены независимые оценки расстояния до пульсаров, которые находятся в пределах интервалов расстояний, определенных другими методами. Также подтверждено наличие радиоизлучения от аномального рентгеновского пульсара XTE J1810-19, получены профили импульса и динамический спектр на частоте 62 МГц.

Наше обнаружение слабого радиоизлучения от двух AXP 1E 2259+586 и 4U 0142+61, обнаружение транзиента AXP XTE J1810-197 (Camilo et al., 2006) и кандидата в AXP 1E 1547,0-5408 (Camilo et al., 2007a), вместе с обнаружением радиоизлучения от источника мягких гамма-всплесков (SGR) 1900+14 (Shitov et al., 2000) демонстрируют, что, по крайней мере, часть AXP и SGR не являются «радиотихими» объектами. Дополнительный аргумент в пользу общей природы радиоизлучения «нормальных» пульсаров и групп AXP – SGR получен с открытием радиопулсара (J1847-0130) с большими значениями периода ($P = 6,7$ с) и производной периода ($\dot{P} = 1,3 \cdot 10^{-12}$ с/с) (McLaughlin et al., 2003), такими же как у AXP и SGR. Таким образом, сложившаяся ситуация приводит к необходимости или пересмотра механизмов радиоизлучения в модели магнетара (Zhang, 2001, Istomin & Sobyenin, 2007), или к рассмотрению других моделей для AXP и SGR без привлечения сверхсильных магнитных полей (см., напр., обзор Marsden et al., 2001, Малов и др., 2003, Истомин и Комберг и др., 2000).

Одно из возможных объяснений отсутствия излучения на более высоких радиочастотах дает модель дрейфовых волн (Малов и др., 2003). В рамках этой модели радиоизлучение с максимумом в районе частоты 100

МГц может генерироваться за счет развития циклотронной неустойчивости (Kazbegi et al., 1992) в пульсарах близких к соосным ротаторам, с углами между осью вращения и направлением вектора магнитного момента $\beta < 10^\circ$.

Отрицательный результат поиска радиоизлучения на частоте 111 МГц (Ershov & Shitov, 2007) можно прокомментировать следующим образом. В этой работе для поиска импульсного излучения от АХР 4U 0142+61 применялась методика обычного суммирования всех периодов пульсара за сеанс наблюдения с последующим сложением нескольких сеансов. При непостоянном характере радиоизлучения от аномальных рентгеновских пульсаров, проявляющемся, как в изменении фазы прихода импульса, так и его потока, например Рис. II.19, обычное суммирование может привести к отрицательному результату.

Глава III. Одиночные нейтронные звезды со слабым рентгеновским излучением (XDINS) и радиотранзиенты (RRAT).

Группа XDINS насчитывает всего семь источников (см табл. III.1). Все объекты были открыты по наблюдениям рентгеновской обсерватории ROSAT. Все семь объединены в одну группу как радиотихие, близкие (сотни парсек) изолированные нейтронные звезды с тепловым излучением за счет остывания. У пяти нейтронных звезд из этой группы обнаружены рентгеновские пульсации с периодами в диапазоне 3 – 12 сек. Циклотронные линии в рентгеновских спектрах дают значения магнитных полей $B \sim 10^{13} - 10^{14}$ Гс, которые подтверждаются оценками полученными из вращательных характеристик для двух пульсаров. На диаграмме $P - \dot{P}$ они занимают промежуточное положение между обычными радиопульсарами и магнетарами.

Предпринимались неоднократные попытки обнаружить периодическое импульсное радиоизлучение или отдельные импульсы от XDINS (Johnston, 2003, Kaplan et al., 2003, Rea et al., 2007, Kondratiev et al., 2007, 2009). Впервые радиоизлучение от объектов этого класса было зарегистрировано в ПРАО на низких частотах от RXJ1308.6+2127 (Malofeev et al., 2004) и чуть позже от RXJ2143.0+0654 (Malofeev et al., 2007).

Табл. III.1 Список XDINS

№	источник	P , с	$\dot{P} \times 10^{-13}$	$\lg L_x$ (эрг/с)	$\lg \dot{E}$ (эрг/с)
1	RX 185635 - 3754	-			
2	RX J0720.4-3125	8.39	0.698		
3	1RXSJ130848.6+212708	10.31	1.120	32.61	33.30 – 33.76
4	RBS 1556	-			
5	RX J0806.4-4123	11.37	<18		
6	RX J0420.0-5022	3.45	<92		
7	1 RXS J214303.7+065419	9.44	<60	(28 – 31)	(31.0)

§ 3.1. Наблюдение XDINS J1308+21.

Результаты, представленные в §3.1 и §3.2 опубликованы в следующих работах: Malofeev et al., 2004, 2006b, 2007, Малофеев и др., 2005, Теплых и др., 2008, 2010.

RX J1308.6+2127 был открыт в рентгеновском диапазоне космической обсерваторией ROSAT в 1999 г. (Hambaryan et al., 2002). В радиодиапазоне наблюдения этого объекта ведутся с 21 декабря 2001 г. Большинство наблюдений было сделано на радиотелескопе БСА ФИАН на частоте 111 МГц, и часть наблюдений была проведена на ДКР-1000 на частотах 42, 61 и 87 МГц. Приемная аппаратура и параметры наблюдений использовались точно такие же, как и для наблюдения АХР.

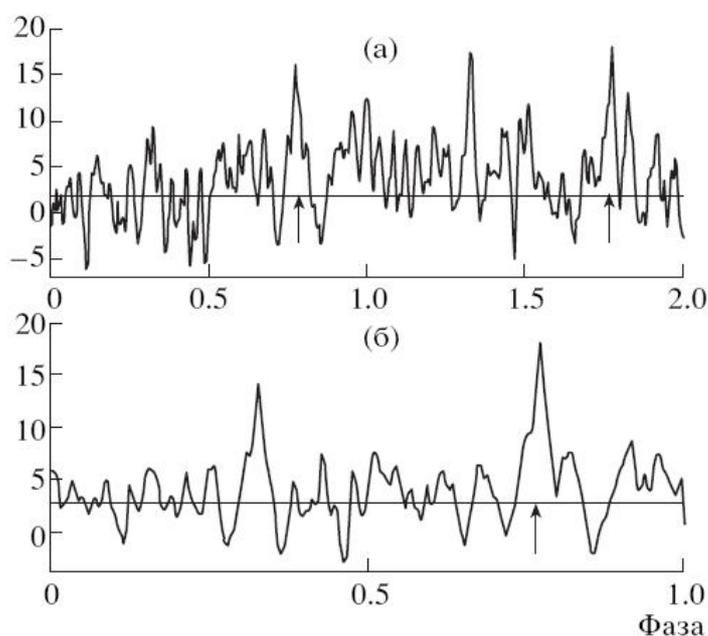


Рис. III.1. Интегральный профиль (в отн. ед.) XDINS J1308+21 на частоте 111.2 МГц, полученный суммированием 4 дней наблюдений или 25 двойных периодов вращения пульсара (а) и свертка с периодом вращения, т.е. сумма 50 импульсов (б). Стрелками указаны фазы прихода импульсов.

3.1.1. Средний профиль

Для обнаружения слабого радиоизлучения от 1RXS J1308+21 на 111, 87, 61 и 42 МГц было получено более 100 пригодных для анализа записей на частоте 111 МГц и примерно по 15 записей на частотах 87, 61 и 42 МГц. Почти все наблюдения проводились с двойным периодом для более уверенной регистрации сигнала. Для улучшения отношения сигнал/шум отдельные дни наблюдений суммировались с привязкой по одному из видимых импульсов. В таком случае ровно через период можно было

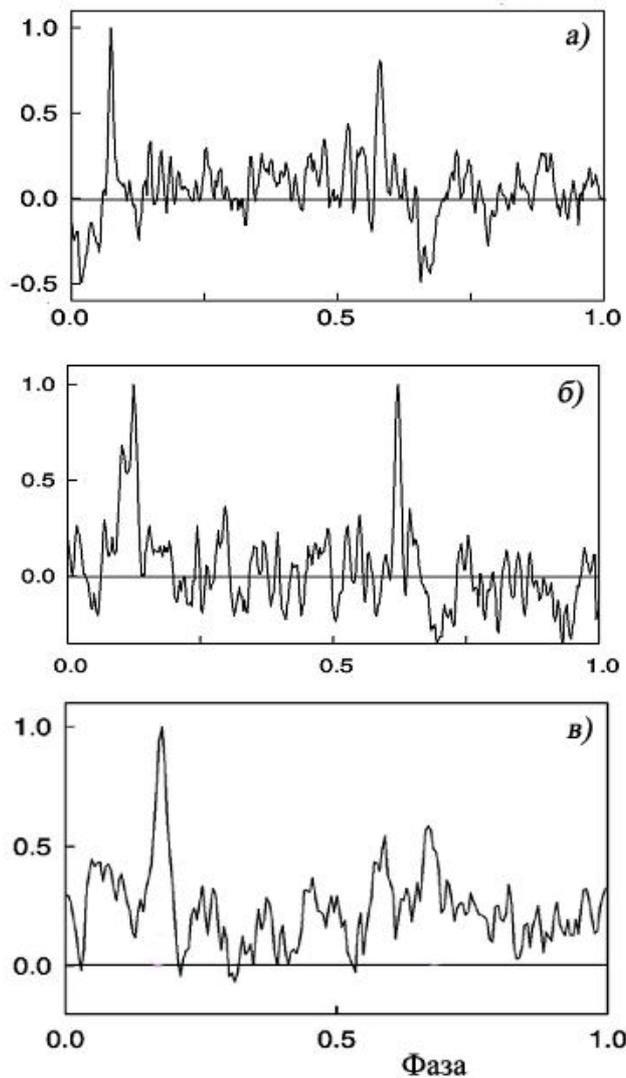


Рис. III.2. Интегральный профиль (в отн. ед.) XDINS J1308+21 на трех частотах: (а) — частота 87.7 МГц, суммировано 2 дня или 14 периодов; (б) — частота 61.8 МГц, суммировано 3 дня или 100 периодов; (в) — частота 42 МГц, суммировано 4 дня или 206 периодов.

наблюдать второй импульс (рис. III.1(a)). У этого пульсара в радиодиапазоне на частоте 111 МГц также наблюдается узкий импульс, который имеет длительность 140 ± 20 мс, или 1.35% периода (рис. III.1(б)). На рис. III.2 показаны средние профили на 87, 61 и 42 МГц. В дополнение к узкому импульсу, этот пульсар показывает интеримпульс в фазе ~ 0.5 периода, который ясно виден на всех частотах (Malofeev et al., 2007, Теплых и др., 2008).

3.1.2. Поиск периодического излучения с неизвестным периодом

Так же проводился поиск радиоизлучения независимым методом с неизвестным периодом с помощью поисковой программы (Тюльбашев и Малов, 2000). Были обработаны несколько дней наблюдений. На Рис. III.3 показан пример амплитудного фурье-спектра для одного из дней наблюдений. Только в пяти сеансах записи источника удалось обнаружить присутствие радиосигнала. В фурье-спектре J1308+21 наблюдается

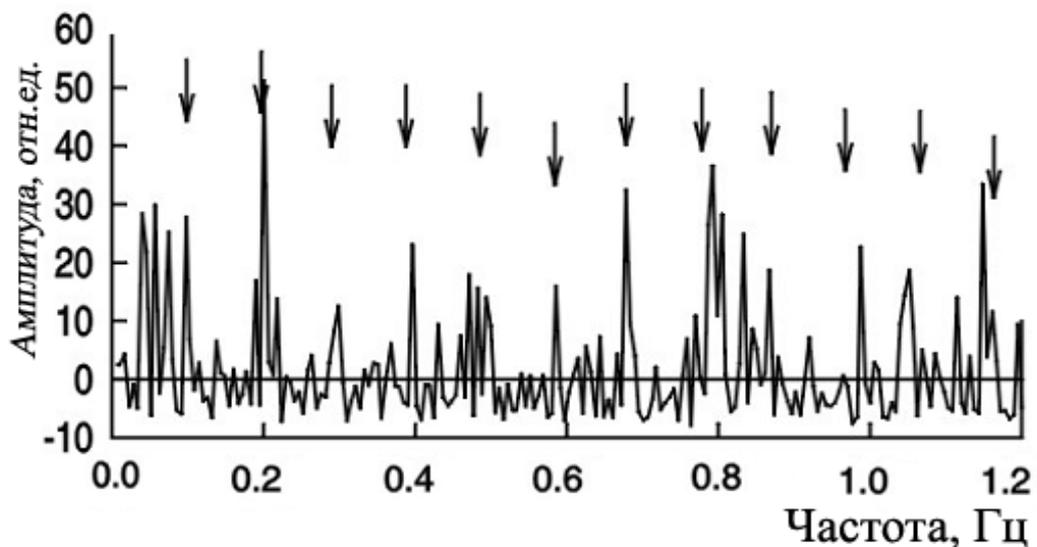


Рис. III. 3. Пример амплитудного фурье-спектра XDRINS J1308+21, полученного на частоте 111.2 МГц за 6.05.2003г. Стрелками показаны фазы фурье-гармоник (период 10.31 с).

несколько гармоник (Malofeev et al., 2004). А после сложения пяти спектров (рис. III.4(б)), в суммарном спектре не только возрастает амплитуда первой гармоники по сравнению с амплитудой, приведенной на рис. III.4(а), но и, вероятно, появляются слабые вторая и третья гармоники (рис. III.4(б)) (Малофеев и др., 2005). Это еще раз подтверждает присутствие излучения в радиодиапазоне.

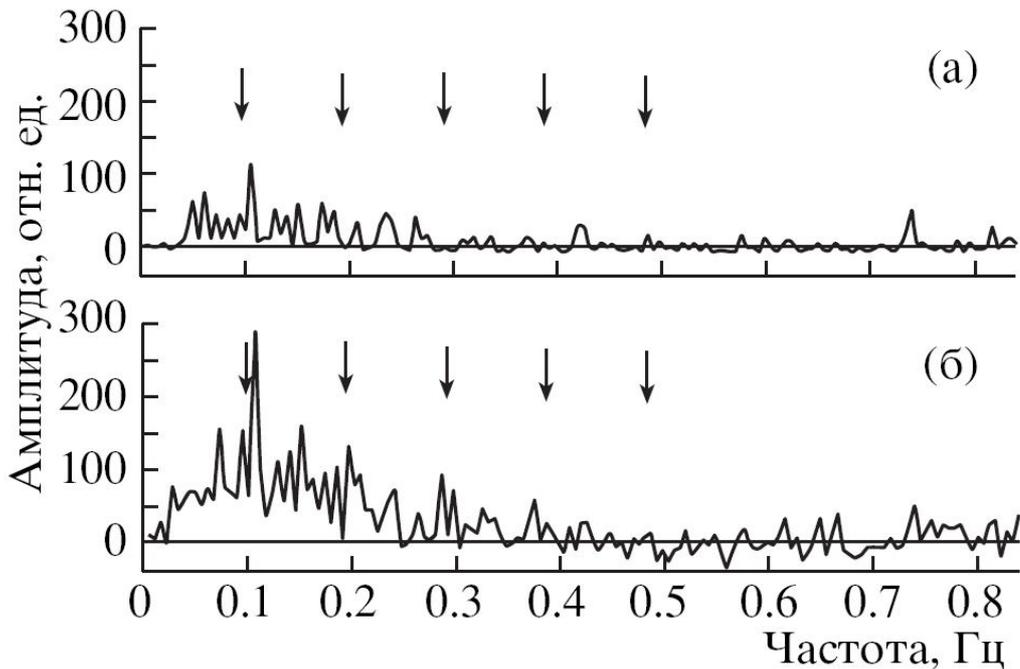


Рис. III.4. Примеры амплитудных фурье-спектров XDINS J1308+21, полученных на частоте 111.2 МГц: (а) — спектр за 1.05.2003, (б) — суммарный спектр за 5 дней наблюдений. Стрелками показаны фазы первых пяти фурье-гармоник (период 10.31 с).

3.1.3. Мера дисперсии

Оценка меры дисперсии DM для J1308+21 проводилась подобным образом, как и в предыдущих случаях, на всех трех частотах: 111, 87 и 62 МГц. Наиболее вероятная величина меры дисперсии равна 5.7 ± 0.5 пк/см³, при которой (рис. III.5) импульс имеет наибольшее значение отношения сигнал/шум и наименьшее значение длительности. Хотя в отличие от двух АХР и максимум, и минимум не так явно выражены.

3.1.4. Плотность потока

Как уже отмечалось выше, плотность потока была измерена относительным способом с использованием калибровочного сигнала. Для J1308+21 измерения потока проводились в течение 10 дней в интервале 1.5 лет. Средняя величина плотности потока с учетом наблюдений, в которых сигнал не превышал 4σ шумов: $S = 50 \pm 20$ мЯн. Вместе со средней величиной приведена 1σ среднеквадратичного разброса плотности потока. На более низких частотах удалось оценить только верхнюю границу плотности потока: $S < 200$ мЯн на частоте 87 МГц.

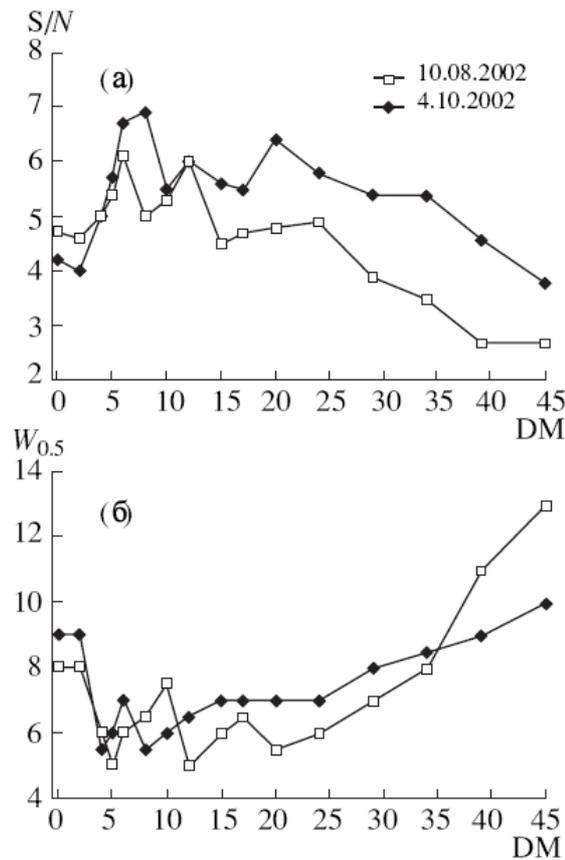


Рис. III.5. Отношение сигнал/шум для интегрального импульса в зависимости от меры дисперсии (а) и длительность импульса $w_{0.5}$ по уровню 0.5 от максимума (б) для XDINS J1308+21.

3.1.5. Период и производная периода

Значение периода и его производной для J1308+21 было получено для интервала эпох MJD 52300–52743 ($P = 10.3143406(8)$ с и $\dot{P} = 1.29(2) \cdot 10^{-11}$ с/с) (Малофеев и др., 2005). Эти данные являются существенно более точными, если сравнить их с данными (Hambaryan et al., 2002), полученными в более раннюю эпоху MJD 50824–51719 и приведенными к одной дате MJD 51719.5.

3.1.6. Расстояние и светимость

Оценка расстояния до XDINSJ1308+21, а точнее до звезды RBS 1223, определенная несколькими методами лежит в широком интервале от 0.1 до 1.5 кпк (Hambaryan et al., 2002; Reach et al., 1993). Используя наши измерения меры дисперсии (Табл. III.2) и упомянутую выше модель Галактики (Taylor & Cordes, 1993, Cordes & Lazio, 2002, 2003), расстояние до пульсара оценили как $D = 0.25 \pm 0.02$ кпк (Малофеев и др., 2005).

Рентгеновская светимость J1308+21 на расстоянии 0.25 кпк будет $L_x = 0.26 \cdot 10^{32}$ эрг/с вместо $L_x = 4.1 \cdot 10^{32}$ эрг/с, вычисленной при расстоянии равном 1 кпк (Hambaryan et al., 2002). Потеря кинетической энергии у этой нейтронной звезды при $P = 10.32$ с и $\dot{P} = 130 \cdot 10^{-13}$ с/с по формуле (II.1) будет равна $\dot{E} = 4.6 \cdot 10^{32}$ эрг/с, что близко к величине рентгеновской светимости. Оценка магнитного поля, вычисленная по формуле (II.3), для данных радионаблюдений: $B \approx 7,4 \cdot 10^{14}$ Гс, характеристическое время (формула II.4): $\tau = 6300$ лет.

3.1.7. Динамический спектр

На рис. III.6 приведен пример индивидуального импульса от J1308+21 на частоте 111 МГц: профиль импульса и динамический спектр. Так как пульсар очень близкий (мера дисперсии $DM \sim 5$ пк/см³) и к тому же имеет очень большой период $P = 10.31$ с, то сдвиг сигнала в полосе 109.584 – 112.084 МГц составляет всего 56 мс или 2 точки, при постоянной времени $\tau = 28.0576$ мс.

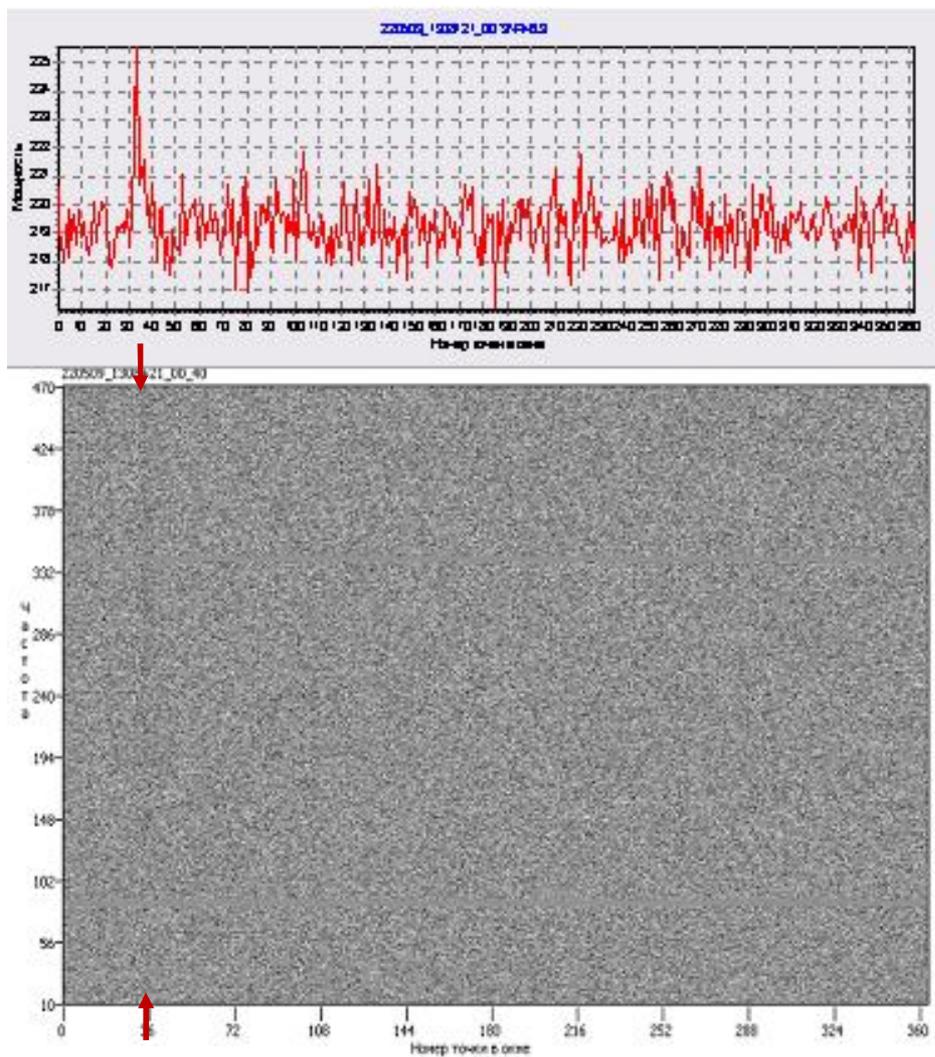


Рис. III.6. Индивидуальный импульс от J1308+21 (наблюдения 22.05.2009) на частоте 111 МГц. Профиль импульса (вверху) и динамический спектр (внизу).

3.1.8. Сравнение с рентгеновскими данными

Средний профиль в радиодиапазоне оказался существенно уже, чем рентгеновском диапазоне (Nambarayan et al., 2002). Длительность среднего импульса по уровню 0.5 амплитуды импульса $w_{0,5} = 0,14 \pm 0,02$ сек, это составляет $\sim 1.4\%$ от периода, а в рентгеновском диапазоне длительность существенно больше и составляет $\sim 25\%$ (см. рис. III.7). Интеримпульс у J1308+21 наблюдается как в рентгеновском, так и в радио- диапазонах.

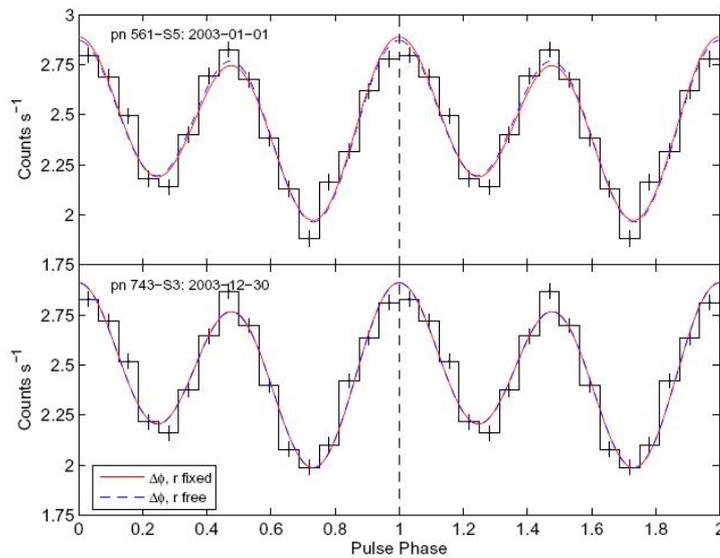


Рис. III.7. Профиль импульса J1308+21 в рентгеновском диапазоне (из работы Karlan & van Kerkwijk, 2005)

§ 3.2. Наблюдение XDINS 1RXS J214303.7+065419

XDINS 1RXS J2143+06 был обнаружен в рентгеновском диапазоне в 2001 г. (Zampieri et al., 2001). Наблюдения в ПРАО этого объекта на радиотелескопе БСА ФИАН на частоте 111 МГц ведутся с октября 2005 г. Приемная аппаратура и параметры наблюдений использовались такие же, как и при наблюдении АХР.

3.2.1. Поиск радиоизлучения с неизвестным периодом

В рамках программы поиска периодического импульсного радиосигнала от этого объекта было проведено две серии наблюдений. С помощью поисковой программы (Тюльбашев и Малов, 2000) было обнаружено периодическое импульсное радиоизлучение в 11 сеансах наблюдений. На рис. III.8 показан пример амплитудного фурье-спектра для одного из дней наблюдений, и на рис. III.9 приведена сумма 11 дней. Хорошо видны несколько первых фурье-гармоник (Malofeev et al., 2007).

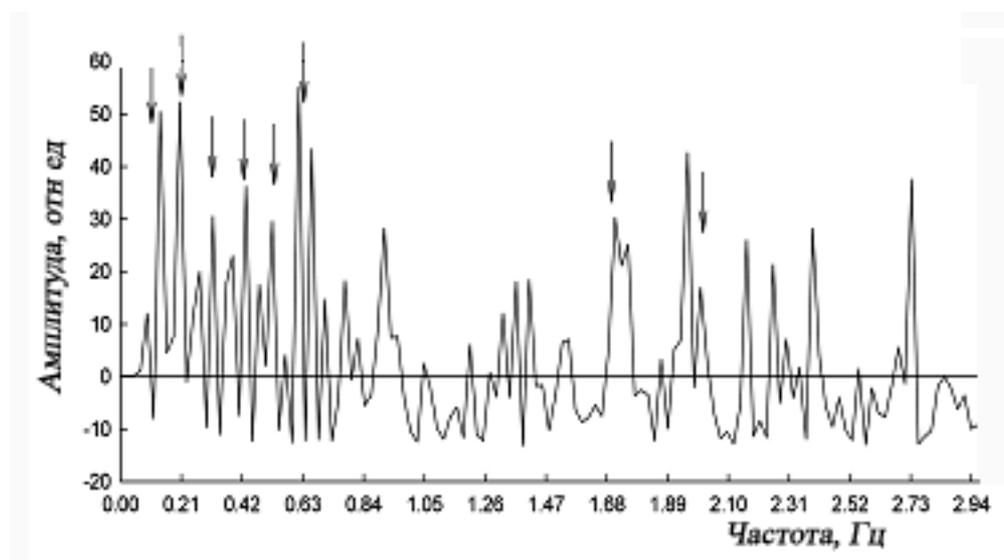


Рис. III.8. Пример амплитудного фурье-спектра XDINS J2143+06, полученного на частоте 111.2 МГц за 3.05.2003 г. Стрелками показаны фазы фурье-гармоник.

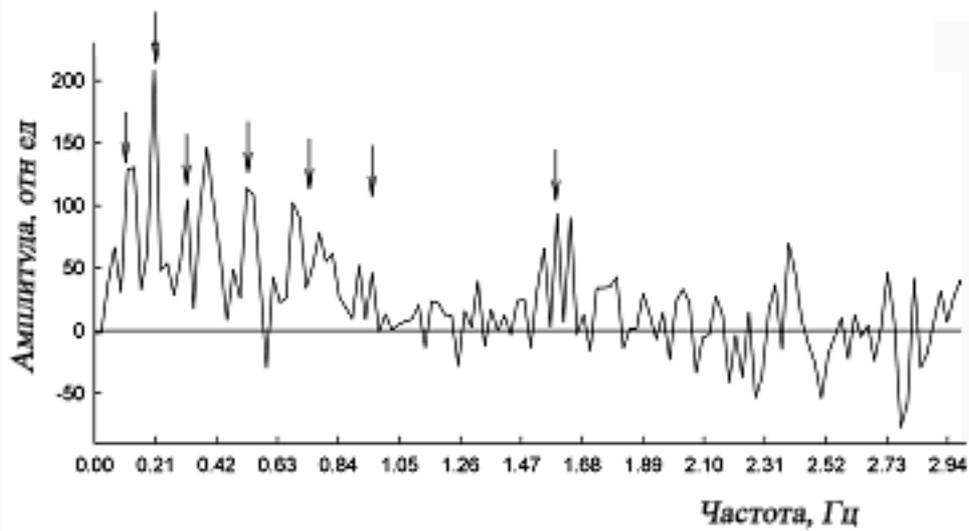


Рис. III.9. Пример амплитудного фурье-спектра XDINS J2143+06, полученного на частоте 111.2 МГц, сумма 11 дней наблюдений. Стрелками показаны фазы первых пяти фурье-гармоник.

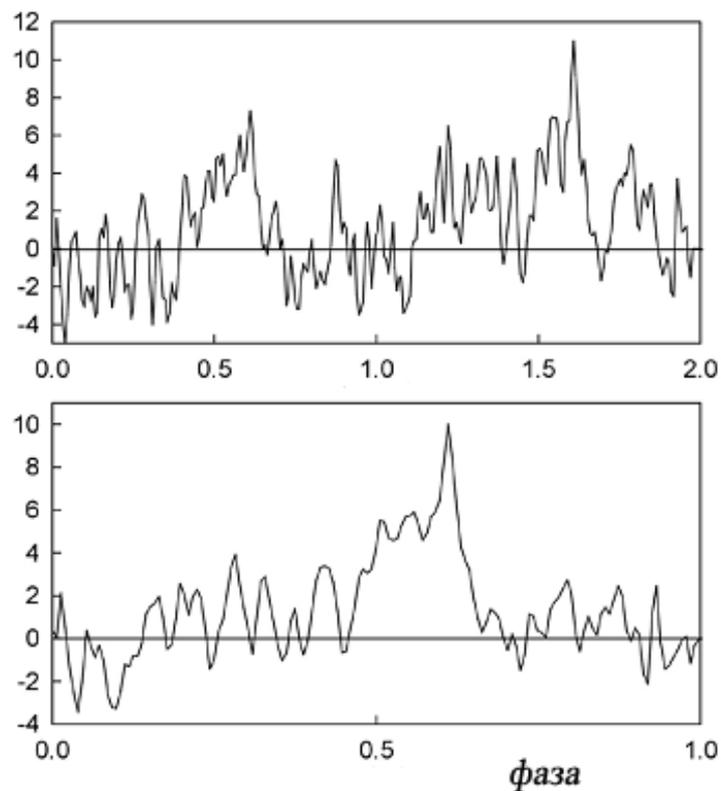


Рис. III.10. Интегральный профиль (в отн. ед.) XDINS J2143+06 на частоте 111.2 МГц за 16.02.2006 г., полученный суммированием 10 двойных периодов вращения пульсара (вверху) и свертка с периодом вращения, т.е. сумма 20 импульсов (внизу).

3.2.2. Средний профиль

За период октябрь 2005 – июнь 2006 для 1RXS J2143+06 на частоте 111 МГц было получено больше 40 записей без сильных помех, пригодных для дальнейшей обработки. Этот пульсар демонстрирует более широкий и более сложный профиль, чем первый XDINS J1308+21 (Рис. III.10). Вполне вероятно, профиль имеет три компонента, отстоящих друг от друга на интервал ~ 400 мс, и полная ширина суммарного профиля по уровню 50 процентов от максимума интенсивности составляет приблизительно 1000 мс (Рис. III.11). На рис. III.12 показаны примеры интегральных профилей импульсов, когда один из компонентов профиля более выражен относительно других. В некоторые дни мы наблюдали интеримпульс в фазе 0.5 периода (Рис. III.13).

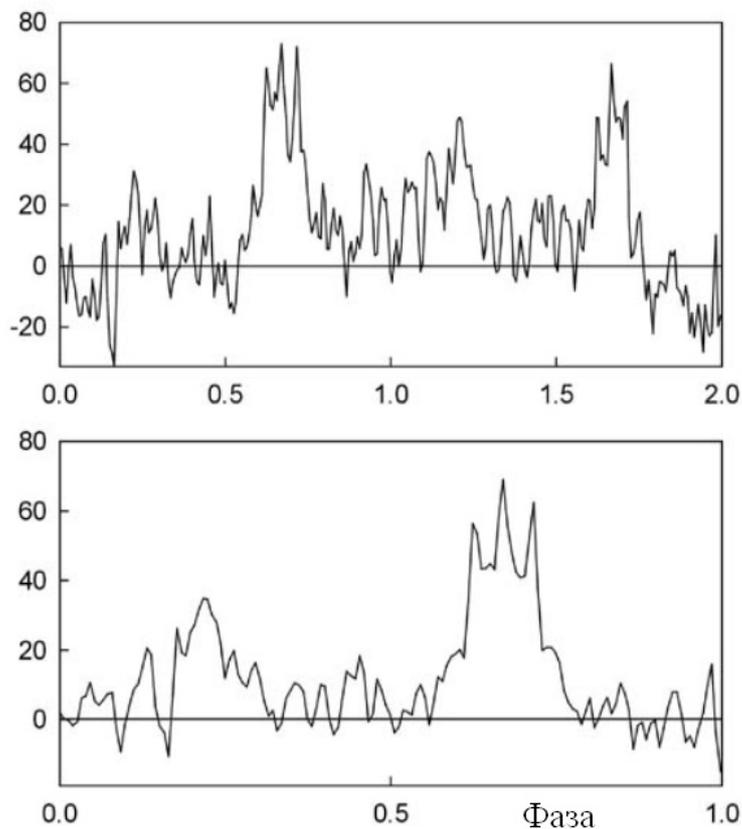


Рис. III.11. Интегральный профиль (в отн. ед.) XDINS J2143+06 на частоте 111.2 МГц, полученный суммированием 23 сеансов наблюдений или 225 двойных периодов вращения пульсара (вверху) и свертка с периодом вращения, т.е. сумма 450 импульсов (внизу).

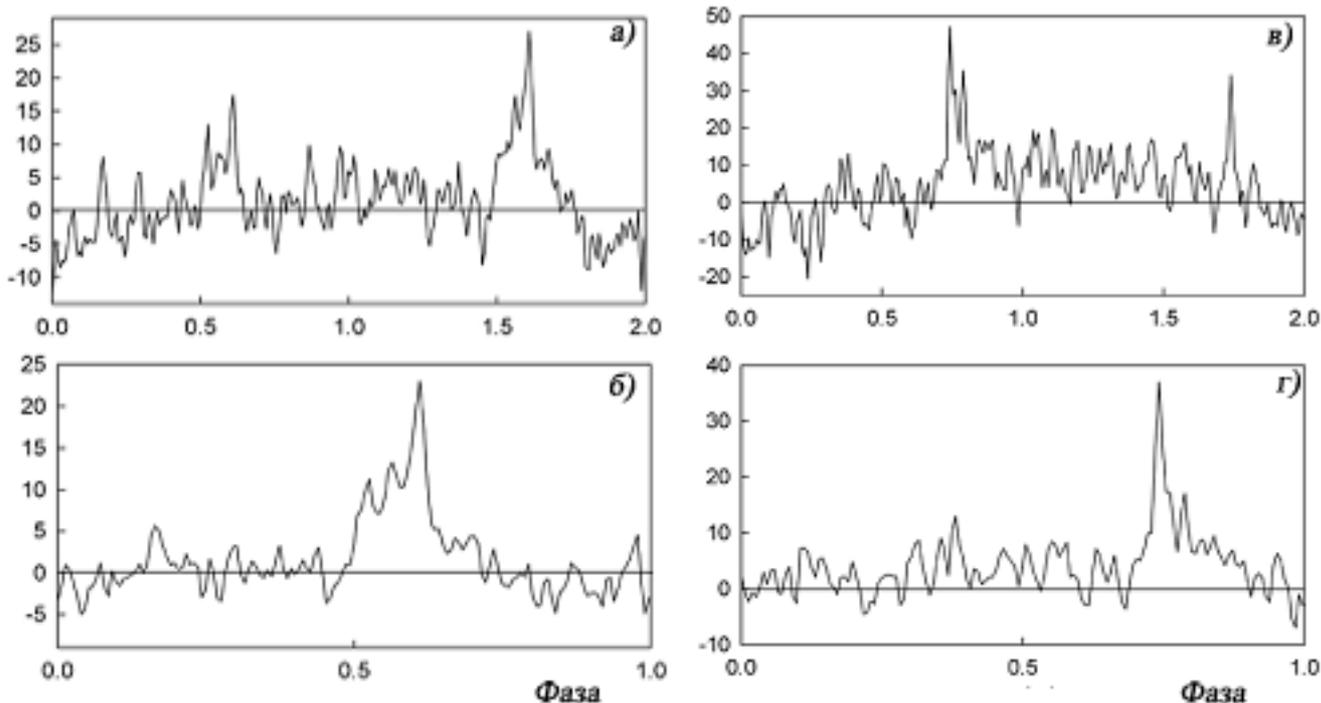


Рис. III.12. Примеры интегральных профилей (в отн. ед.) X-DINS J2143+06 на частоте 111.2 МГц. (а) – полученный суммированием 4 сеансов наблюдений или 38 двойных периодов вращения пульсара; (б) – свертка с периодом вращения, т.е. сумма 76 импульсов; (в) – полученный суммированием 7 сеансов наблюдений или 68 двойных периодов вращения пульсара; (г) – свертка с периодом вращения, т.е. сумма 136 импульсов;

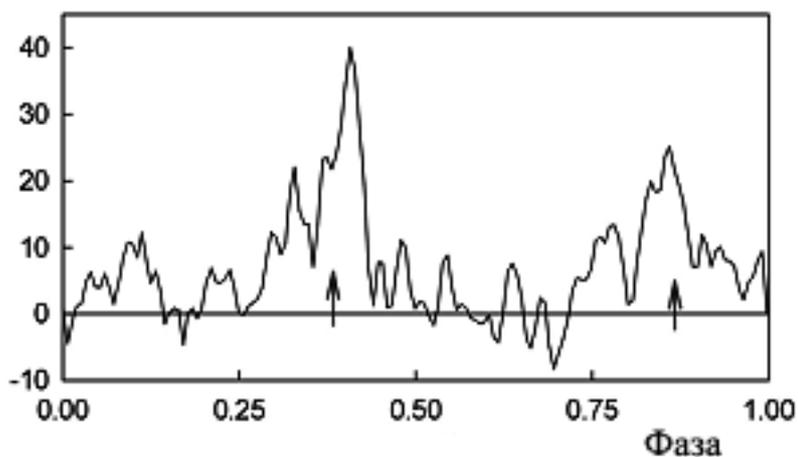


Рис. III.13. Интегральный профиль (в отн. ед.) X-DINS J2143+06 на частоте 111.2 МГц, полученный суммированием 4 дней наблюдений или 20 периодов вращения пульсара. Стрелками указаны фазы прихода импульса и интеримпульса.

3.2.3. Мера дисперсии и расстояние

Оценка меры дисперсии DM для J2143+06 проводилась подобным образом, как и в предыдущих случаях. Наиболее вероятная величина меры дисперсии равна 8 ± 5 пк/см³, что дает оценку для расстояния до пульсара $D = 0.4 \pm 0.2$ кпк. (Табл. III.2) (Malofeev et al., 2007).

Дополнительно мера дисперсии была уточнена независимым методом с помощью корреляционного анализа данных. Для увеличения отношения сигнал/шум при поканальной записи пульсарного импульса применен кросс-корреляционный метод: вычислялась кросс-корреляционная функция между

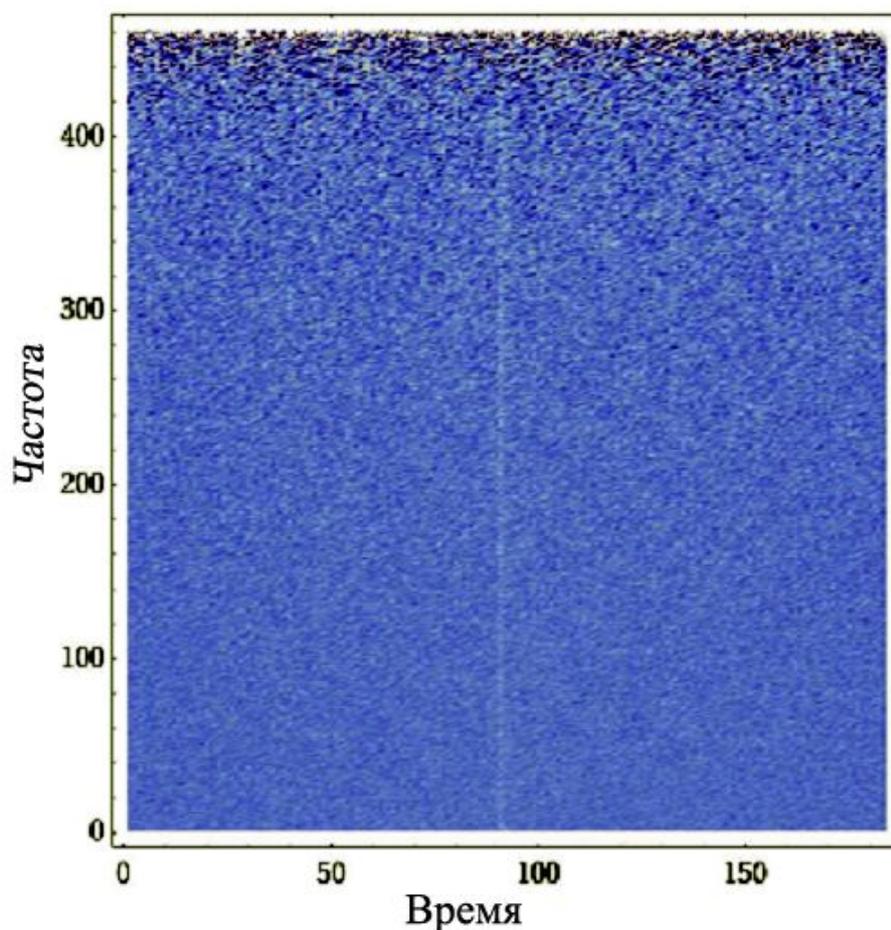


Рис. III.14. Частотно-временная зависимость сигнала от J2143+06 (набл. 17.05.2008 на 111 МГц), с учетом меры дисперсии DM .

всеми парами частотных каналов. Затем все кросс-корреляционные функции упорядочивались по разности номеров частотных каналов и усреднялись с весами. Веса вычислялись как дисперсия первой разности отсчетов. На рис. III.14 приведена частотно-временная зависимость сигнала от J2143+06 на частоте 111 МГц, с учетом меры дисперсии DM (Теплых и др., 2010).

3.2.4. Плотность потока и радиосветимость

Измерения плотности потока проведены относительным методом на частоте 111 МГц с калибровкой и привязкой к дискретным радиоисточникам с известной плотностью потока. Для XDINS 1RXS J2143+06 оценка плотности потока получена по 6 дням наблюдений, когда был виден сигнал с амплитудой больше 4σ шумов, $S_{111} = 60 \pm 20$ мЯн (Malofeev et al., 2007).

Значение радиосветимости приведено в табл. III.2. В работе (Kondratiev et al., 2009) приводятся верхние пределы для радиосветимостей на частотах 820 и 1400 МГц и, с учетом наших измерений, дана оценка спектрального индекса $\alpha < -4$.

3.2.5. Период и производная периода

Период и его производная вычислялись в интервале эпох MJD 53657.7 – 53799.3. Удалось уточнить значение периода $P = 9.43707(10)$ с по сравнению с рентгеновскими данными. В первой работе об обнаружении слабой одиночной нейтронной звезды в рентгеновском диапазоне (Zampieri et al., 2001) не приводится значение производной периода. Наше значение $\dot{P} = -15(22) \cdot 10^{-13}$ с/с сильно отличается от значения производной периода приведенной в более поздней работе (Zane et al., 2005) $\dot{P} = 11 \cdot 10^{-13}$ с/с и это требует дальнейшего исследования.

3.2.6. Сравнение с рентгеновскими данными

Сравнение с рентгеновскими данными показало существенные отличия в длительности среднего импульса. В радиодиапазоне длительность импульса в пять раз меньше, чем в рентгеновском диапазоне.

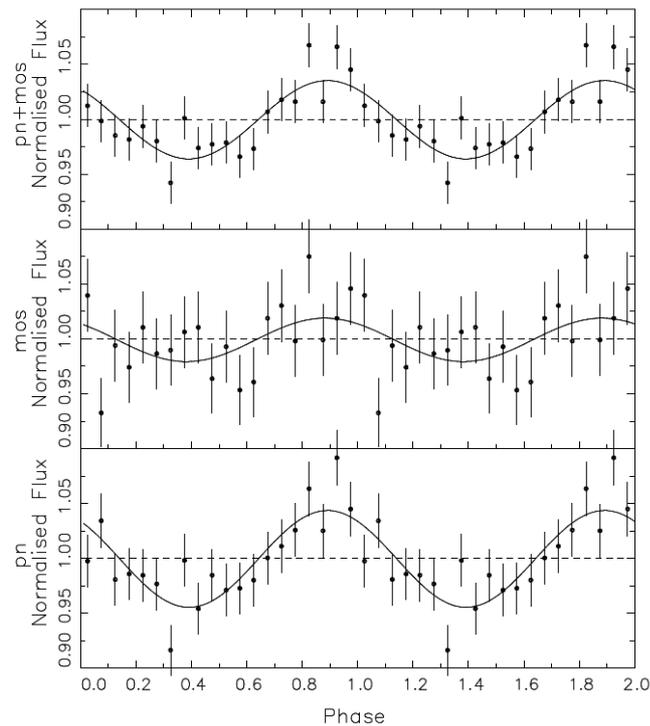


Рис. III.15. Профиль импульса *1RXS J2143+06* в рентгеновском диапазоне (0.15 – 3 кэВ) (из работы *Zane et al., 2005*).

Табл. III.2. Измеренные и вычисленные параметры двух XDINS

	1 RXSJ130848.6+21	1 RXS J214303.7+06
P (с)	10.31433994(2)	9.43704(2)
\dot{P} (10^{-13} с/с)	129.96(5)	- 1.5 (22)
Эпоха наблюдений (MJD)	52300–52743	53657.7 – 53799
Эпоха (MJD)	51719.5	53657.7
DM (см^{-3} пк)	5.7(0.5)	8(5)
D (кпк)	0.25	0.4
S (мЯн)	50 σ = 20	60 σ = 25
$\omega_{0.5}$ (111МГц)(мс)	140(20)	990(60)
L_R (эрг/см)	$3 \cdot 10^{26}$ ($\alpha = 2.5$)	$9 \cdot 10^{26}$ ($\alpha = 2.5$)
B (Гс)	$1.2 \cdot 10^{14}$	
T (год)	$2.2 \cdot 10^5$	

§ 3.3. Радиотранзиенты. Наблюдения RRAT J1819-14

Радиотранзиенты (Rotating Radio Transient – RRAT) – новый класс нейтронных звезд, открытых по отдельным радиовспышкам (McLaughlin et al., 2006). На сегодняшний день обнаружено примерно 50 объектов этого класса. Эти источники характеризуются отдельными вспышками с длительностью 2 — 30 мс, с максимальной плотностью потока 0.1 — 4 Ян и средним интервалом между вспышками от 4 мин до 3 часов. Анализ моментов прихода импульса позволил установить периодичность, у 25 объектов определены периоды, которые лежат в пределах 0.125 — 7 сек. Для семи источников удалось измерить производные периода (McLaughlin et al., 2006, 2009). В табл. III.3 приведен список 25 радиотранзиентов, для которых удалось измерить периоды. Оценки магнитных полей составляют 10^{12} — 10^{14} Гс и характеристические возраста $T \sim 0.1$ — $3 \cdot 10^6$ лет. На диаграмме $P - \dot{P}$ радиотранзиенты занимают ту же область, что и XDINS, между магнетарами и обычными радиопульсарами (Рис.1).

RRATJ1819-14 — один из самых сильных источников этой группы (пиковая плотность потока равна 3600 Ян, см. Табл. III.3), и наиболее часто излучающий. От этого пульсара периодическое импульсное излучение было обнаружено также в рентгеновском диапазоне на телескопе XMM-Newton (McLaughlin et al., 2007). В отличие от излучения в радиодиапазоне, в рентгене этот пульсар не проявляет никакой вспышечной активности. Рентгеновский спектр J1819-14 похож на спектры XDINS, и имеет широкую линию поглощения, как и XDINS. Также этот пульсар, возможно, отождествлен в ближнем ИК диапазоне (Rea et al., 2010).

Табл. III. 3. Список радиотранзиентов с измеренными периодами. (Данные из работ [1] - McLaughlin et al., 2006; [2] - Deneva et al., 2009; [3] - McLaughlin et al., 2009; [4] - Keane et al., 2010)

Источник	P, c	$w_{0.5},$ мс	$\dot{P}, 10^{-15}$	$DM, \text{нк/см}^3$	$D,$ кпк	$S_{1400},$ мЯн	$N_p/T_{\text{obs}},$ час $^{-1}$	ссыл ки
J0627+16	2.180	0/3		113	3.2	150	48/2	2
J0628+09	1.241	10		88	2.5	85	42/0.29	2
J0848-43	5.97748(2)	27	119.94(2)	293(19)	5,5	100	27/19	1, 3
J1047-58	1.23129(1)	3.7		69.3 (3.3)	2.3	630	8/8.96	4
J1317-57	2.64219790742(3)	12	12.560(3)	145.4(3)	3,2	1100	108/24	1, 3
J1423-56	1.42721(7)	4.5		32.9(1.1)	1.3	930	9/10	4
J1444-60	4.758565(5)	21	18.542(8)	369(8)	5,5	280	32/41	1, 3
J1514-59	1.046109(4)	3.3		171.7(0.9)	3.1	830	9/4.6	4
J1554-52	0.12522947(7)	1.0		130.8(0.3)	4.5	1400	8/4.3	4
J1707-44	5.763752(5)	12.1		380(10)	6.7	575	5/2.6	4
J1724-35	1.42199(2)	5.9		554.9(9.9)	5.7	180	12/10	4
J1754-30	0.422617(4)	16		98(6)	2,2	160	18/30	1
J1807-25	2.76413(5)	4.0		385(10)	7.4	410	7/4	4
J1819-14	4.263159894(6)	3	576(1)	196(3)	3,6	3600	229/13	1
J1826-14	0.7706187(3)	2	8.7841(2)	159(1)	3,3	600	18/17	1,3
J1839-01	0.93190(1)	15		307(10)	6,5	100	8/13	1
J1841-14	6.597547(4)	2.6		19.4(1.4)	0.8	1700	13	4
J1846-02	4.476739(3)	15	160.587(3)	239(10)	5,2	250	11/10	1, 3
J1848-12	6.7953(5)	2		88(2)	2,4	450	10/8	1
J1854+03	4.559	50		216	5.5	14	9/4.5	2
J1909+06	0.741	1.5		35	2.2	82	10/0.15	2
J1913+13	0.9233885242(1)	2	8.6799(2)	175.8 (3)	5,7	650	66/14	1, 3
J1919+17	2.081	100		148	5.3	12	35/0.11	2
J1928+15	0.403	5		242	7.4	180	3/0.78	2
J1946+24	4.729	4		96	4.3	101	4/0.07	2

3.3.1. Наблюдения J1819-14 на БСА ФИАН

Результаты, полученные в этом параграфе, опубликованы в работах: Terlykh, 2009, Terlykh et al., 2009

В ПРАО наблюдения J1819-14 начались с января 2008 с помощью новой цифровой установкой на частоте 111 МГц. За один сеанс наблюдения на БСА ФИАН регистрировалось 46 периодов пульсара. Всего проведено около 12 дней наблюдений на частоте 111 МГц. Для случая RRAT, когда импульсы следуют очень редко и их время появления составляет несколько процентов от времени наблюдения, критерий 1) (§ 1.3) не работает, но зато основным становится критерий 2) и поиск фазы прихода среднего импульса происходит путем суммирования индивидуальных сильных импульсов. Поэтому нами проводился поиск отдельных импульсов с отношением сигнал/шум больше 3 и накопление их в одной фазе (Terlykh et al., 2009). На рис. III.16а приведен пример интегрального профиля импульса, полученного суммированием 49 импульсов (за 4 дня наблюдений в серии январь 2009). Динамические спектры получены двумя способами: с учетом меры дисперсии $DM = 196$ пк/см³ (рис. III.16в) и без компенсации меры дисперсии (рис. III.16б). Вертикальный дисперсионный трек виден более явно. Длительность импульса по уровню 0.5 амплитуды $w_{0.5} \approx 70$ мс. Импульс, по-видимому, искусственно заужен в результате применения метода накопления импульсов и вероятно, что длительность импульса больше 100 мс, что является достаточно странным, принимая во внимание большую величину меры дисперсии $DM = 196$. Известно, что с увеличением меры дисперсии растет величина рассеяния импульса, которая проявляется в уширении за счет хвоста на заднем фронте профиля импульса и соответственно уменьшения амплитуды сигнала. В зависимости величины рассеяния $\tau_{\text{рас}}$ от

меры дисперсии, полученной в работе (Pynzar, 2007), для $DM = 196$ пк/см³ разброс $\tau_{\text{рас}}$ составляет от $5 \cdot 10^{-6}$ мс до $2 \cdot 10^{-3}$ мс на частоте 1 ГГц, что соответствует величинам $33 \cdot 10^{-3}$ с и 12 с на частоте 111 МГц, при зависимости $\tau_{\text{рас}}(\nu) \sim (\nu/\nu_0)^{-4}$, где $\nu_0 = 1$ ГГц. Таким образом, в нашем случае длительность импульса равная 100 мс на частоте 111 МГц соответствует нижней границе на зависимости $\tau_{\text{рас}}(DM)$. На рис. III.17 приведен интегральный профиль импульса, полученный суммированием 93 импульсов за 7 дней наблюдений, а также динамический спектр. К сожалению, нам так и не удалось зарегистрировать ни одного сильного индивидуального импульса с $S/n > 7$, подобно наблюдаемым на 1400 МГц.

Была вычислена пиковая плотность потока $S_{\text{п}(111)} \approx 17$ Ян и длительность импульса на 111 МГц. Получена оценка спектрального индекса $\alpha = -1.5$. Это значение близко к значению среднего спектрального индекса нормальных радиопульсаров. Также было вычислено отношение наблюдаемого количества импульсов (вспышек) к общему времени наблюдений, на частоте 111 МГц эта величина составила 5% (Terlykh et al., 2009). Для сравнения на частоте 1400 МГц отношение общего числа вспышек к общему времени наблюдения составляет 2%, т.е. на низких частотах вспышки - возможно, явление более частое. Эти данные требуют дальнейшего подтверждения, и мы планируем продолжить исследования этого пульсара на всех трех частотах нашего диапазона (111, 62 и 42 МГц).

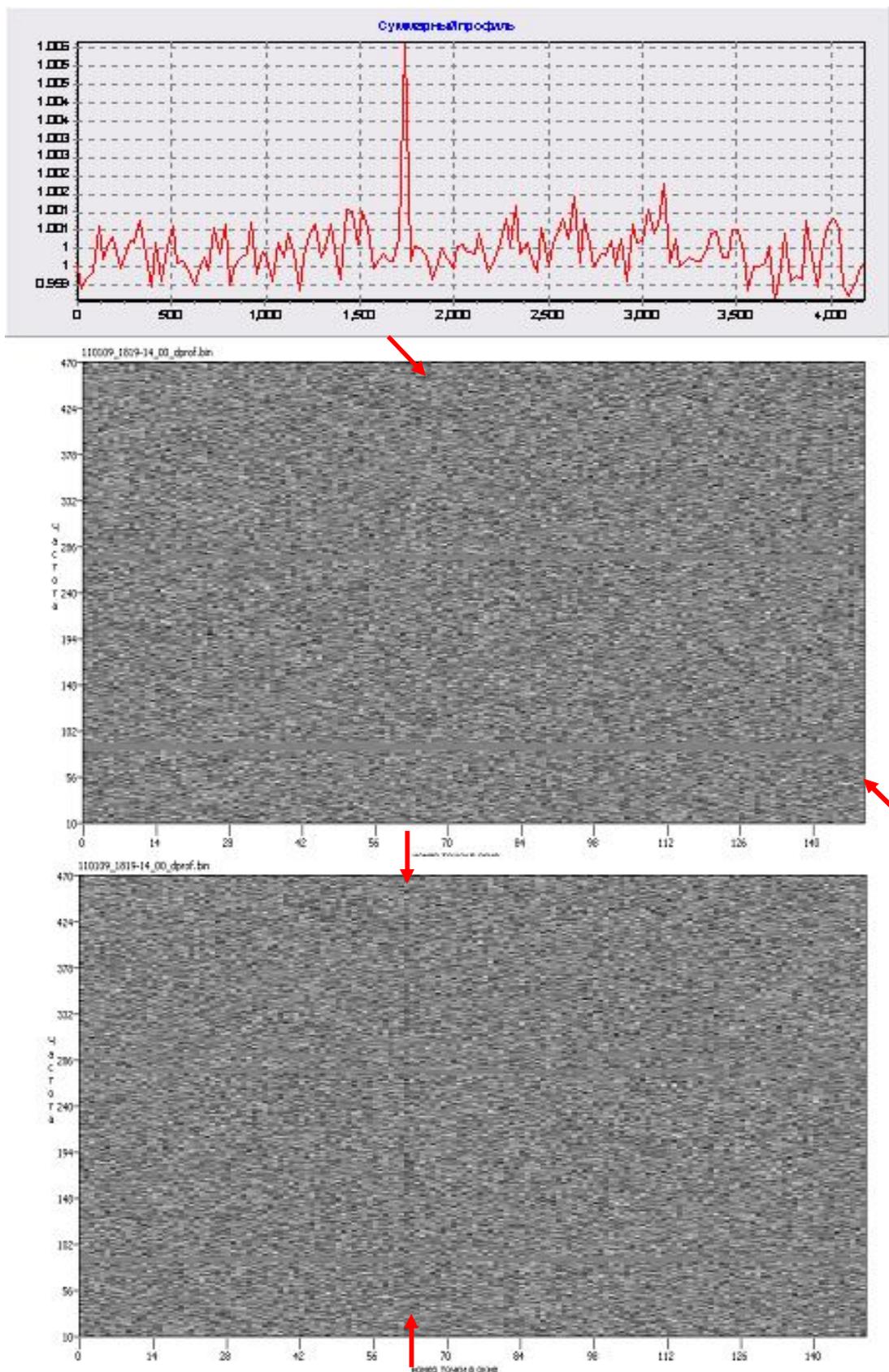


Рис. III.16. Интегральный профиль импульса радиотранзientного пульсара 1819-14 на частоте 111 МГц, полученный путем суммирования 4 дней наблюдений из серии январь 2009, всего накоплено 49 импульсов (а); (б) – динамический спектр, полученный без учета меры дисперсии; (в) – динамический спектр, полученный с учетом меры дисперсии. Стрелками обозначены начало и конец дисперсионных треков на динамических спектрах

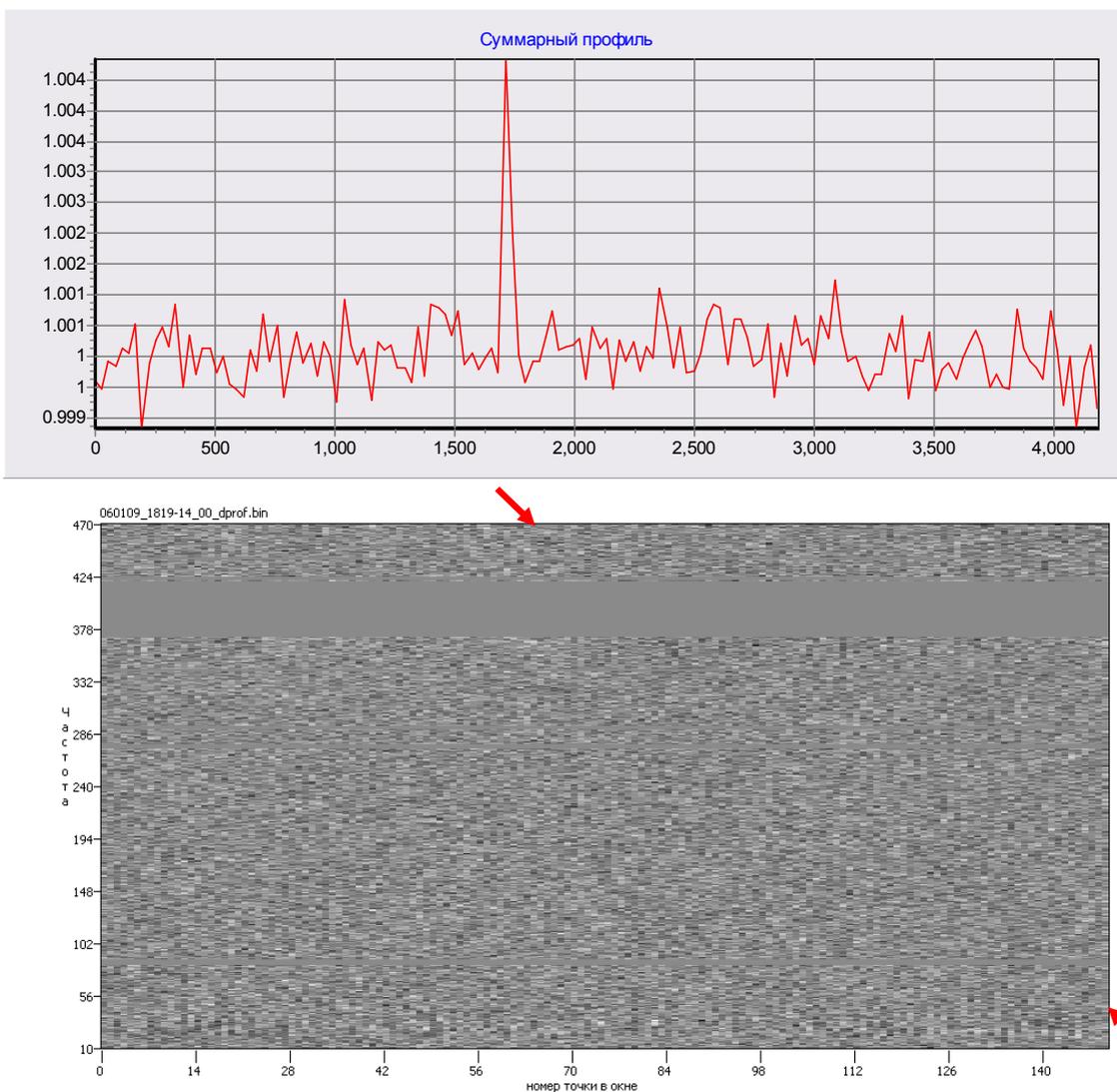


Рис. III.17. Интегральный профиль импульса радиотранзиентного пульсара 1819-14 на частоте 111 МГц, полученный путем суммирования 7 дней наблюдений, всего накоплено 93 импульса (а); (б) – динамический спектр, полученный без учета меры дисперсии. Стрелками обозначены начало и конец дисперсионных треков на динамических спектрах

Выводы к Главе III

Обнаружено слабое периодическое импульсное радиоизлучение от двух XDINSs на двух телескопах ПРАО АКЦ ФИАН, на четырех низких частотах от RX J1308.6+2127 и на частоте 111 МГц от RX J2143.0+0654. В Табл. III.2 перечислены основные параметры радиоизлучения для двух объектов. Получены независимые оценки расстояния до пульсаров, которые лежат в интервале расстояний, полученными другими методами. Основным отличием радиоизлучения от рентгеновского излучения является более узкий интегральный импульс у обоих объектов. У пульсара J1308+21 радио- и рентгеновская светимости отличаются на 6 порядков.

Учитывая верхние оценки плотности потока на более высоких частотах 820 и 1400 МГц из работы (Kondratiev et al., 2009), получаем, что оба XDINS имеют очень крутые спектры со спектральным индексом $\alpha < -4$, таким же аномально большим, как и пульсара Геминга. (Malofeev & Malov, 1997).

Зарегистрировано радиозлучение от RRAT J1819-14 на частоте 111 МГц. Возможно, на этой частоте отдельные импульсы от этого радиотранзиента приходят чаще, чем на 1.4 ГГц (McLaughlin et al., 2006). Сделаны оценки спектрального индекса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая диссертационная работа посвящена поиску и исследованию радиоизлучения от нескольких групп аномальных пульсаров на низких частотах с целью получения новых наблюдательных данных о механизме их радиоизлучения и эволюции.

Подведем основные результаты работы:

1. На радиотелескопах БСА ФИАН и ДКР-1000 Пушинской радиоастрономической обсерватории проведены наблюдения нескольких групп аномальных пульсаров. В результате работы обнаружено слабое радиоизлучение в метровом диапазоне волн у Аномального рентгеновского пульсара (АХР) 4U 0142+61 и двух слабых, рентгеновских, изолированных нейтронных звезд (XDINS): 1RXSJ1308+21 и J2143+06.
2. Впервые в радиодиапазоне измерены или получены оценки основных параметров перечисленных выше пульсаров, а также АХР 1E 2259+586: период и его производная, мера дисперсии и расстояние, плотность потока и средний профиль на нескольких частотах метрового диапазона, а также интегральная радио-светимость.
3. Проведено сравнение основных параметров с измерениями в рентгеновском диапазоне и показано, что основное различие заключается в длительности среднего профиля и наличии сильных временных флуктуаций радиоизлучения, как в

течение одного сеанса наблюдений, так и на более длительных временных масштабах. Кроме того было подтверждено наличие радиоизлучения в метровом диапазоне волн для нескольких аномальных пульсаров (AXPХТЕJ1810-19 и радиотранзиентный пульсар (RRATs) J1819-14), измерены их средние профили и плотности потоков, даны оценки спектральных индексов.

Обнаружение слабого радиоизлучения от аномальных рентгеновских пульсаров (AXP), гамма-репитеров (SGR) и слабых одиночных нейтронных звезд (XDINS) показывает, что, по крайней мере, часть этих объектов не являются «радиотихими». Дополнительный аргумент в пользу общей природы радиоизлучения «нормальных» пульсаров и групп AXP – SGR получен с открытием радиопульсара (J1847-0130) с большими значениями периода и производной периода, такими же как у AXP и SGR. Таким образом, сложившаяся ситуация приводит к необходимости пересмотра механизмов радиоизлучения в модели магнетара или рассмотрению других моделей для AXP и SGR без привлечения сверхсильных магнитных полей.

ЛИТЕРАТУРА

Бисноватый-Коган Г.С., Комберг Б.В. (1974) АЖ, 51, 373

Виткевич В.В., Глушаев А.А., Илясов Ю.П. и др., (1979) Изв. ВУЗов.
Радиофизика, 19, 1594

Виткевич В.В., Калачев П.Д. (1965) Труды ФИАН, 28, 5

Ивашев-Мускатов О.С. (1979) Теория вероятности и математическая
статистика, М.: Наука

Истомин Я. Н., Комберг Б. В. (2000) АЖ, 77, 852

Кузьмин А.Д., Лосовский Б.Я. (1997) ПАЖ, 23, 323

Кутузов С.М., Азаренков Ю.И., Алексеев И.А. и др. (2000) Труды ФИАН,
229, 3

Логвиненко С.В. (2006) Отчет ПРАО АКЦ ФИАН

Малов И.Ф., Малофеев В. М., Сенье Д. С. (1994) АЖ, 71, 762

Малов И. Ф., Мачабели Г. З., Малофеев В. М. (2003) АЖ, 80, 258

Малофеев В.М., Малов И.Ф. (1980) АЖ, 57, 90.

Малофеев В.М. (1989) Труды ФИАН., 199, 125

Малофеев В. М., Малов О. И., Щеголева Н. В., (2000) АЖ, 77, 499

Малофеев В.М., Малов О.И., (2000) АЖ, 77, 52

Малофеев В. М., Малов О. И., Теплых Д. А. и др. (2005) АЖ, 82, 273

Малофеев В.М., Теплых Д.А, Малов О.И. (2010) АЖ, 87, 1082

Малофеев В.М., Теплых Д.А., Логвиненко С.В. (2011) АЖ (в печати)

Манчестер Р., Тейлор Дж., (1980) «Пульсары», Изд.: Мир

Попов М.В., Кузьмин А.Д., Ульянов О.М. и др. (2006) АЖ, 83, 630

Попов М.В., Согласнов В.А., Кондратьев В.И. и др. (2008) АЖ, 85, 999

Попов С.Б., Прохоров М.Е., Труды ГАИШ, Том LXXII, 2003

Сулейманова С.А., Пугачев В.Д., (2002) АЖ, 79, 345

Теплых Д.А., Малофеев В.М., Малов О.И. (2008) Радиофизика и
радиоастрономия, 13, 109

Теплых Д.А., Родин А. Е., Малофеев В. М., Логвиненко С. В. (2010) Сборник
трудов XIII Школы молодых ученых «Актуальные проблемы
физики», Москва, Изд.: ФИАН, с. 211

Тюльбашев С. А., Малов О. И. (2000) АЖ, 77, 737

Baade W., Zwicky F. (1934) Proc. Nati. Acad. Sci, 20, 254

Baring M.G., Harding A.K., (1998) ApJ, 507, L55

Bertsch D.L., Brazier K.T.S., Fichtel C.E. et al. (1992) Nature, 357, 306

Camilo F., Ransom S. M., Halpern J. P., et al., (2006) *Nature*, 442, 892

Camilo F., Ransom S. M., Halpern J. P., Reynolds J. (2007a) *ApJ*, 666, L93

Camilo F., Reynolds J., Johnston S. et al. (2007b) *ApJ*, 659, L37

Camilo F., Cognard I., Ransom S.M et al. (2007c) *ApJ*, 663, 497

Camilo F., Ransom S.M., Penalver J. et al., (2007d) *ApJ*, 669, 561

Coe M. J., Jones Z. R., Lehto H. (1994) *MNRAS*, 270, 179

Cole T.W., Hess H.K., Page C.G. (1970) *Nature*, 225, 712

Cropper M., Haberl F., Zane S., Zavlin V. E. (2004) *MNRAS*, 351, 1099

Danilenko A.A., Zyuzin D.A., Shibano Yu.A., Zharikov S.V. (2011) *MNRAS* (in press)

Deneva J.S., Cordes J.M., McLaughlin M.A. et al. (2009) *ApJ*, 703, 2259

Dib R., Kaspi V., Gavriil F. (2007) arXiv:astro-ph/0610932

Duncan R. C., Thompson C. (1992) *ApJ (Lett.)*, 392, L9

Ershov A.A., Shitov Yu.P. (2007) eprint arXiv:0710.2160

Fahlman G.G., Gregory P.C. (1981) *Nature*, 293, 202

Fitchel C.E., Hartman R.C., Kniffen D.A., et al. (1975) *ApJ*, 198, 163

Gaensler, B.M, Slane, P.O., Gotthelf, E.V., Vasisht, G. (2001) *ApJ*, 559, 963

Gavriil F. P., Kaspi V. M., Woods P. M. (2002) *Nature*, 419, 142

Gavriil F.P., Kaspi V.M. (2002) *ApJ*, 567, 1067

Gold T. (1968) *Nature*, 218, 731

Cordes J.M., Lazio T.J.W (2002) arXiv: astro-ph/0207156

Cordes J.M., Lazio T.J.W (2003) arXiv:astro-ph/0301598

Gregory P. C., Fahlman G. G. (1980) *Nature* 287, 805

Haberl F., Motch C., Zavlin V. E. et al. (2004) *A&A*, 424, 635

Halpern J.P., Holt S.S. (1992) *Nature*, 357, 222

Halpern J.P., Gotthelf E.V., Becker R.H. et al. (2005) *ApJ*, 632, L29

Hambaryan V., Hasinger G., Schwobe A.D., Schulz N.Z. (2002) *A&A*, 381, 98

den Hartog P.R., Kuiper B., Hermsen W. et al. (2007) *Ap&SS*, 308, 647

Hellier C. (1994) *MNRAS*, 271, L21

Hewish A., Bell S.J., Pilkington J.D.H. et al (1968) *Nature*, 217, 709

Hughes V. A., Harten R. M., Costain C. H., et al. (1984) *ApJ*, 283, 147

Hulse R. A., Taylor J. H. (1975) *ApJ (Lett)*, 195, L51

Hurley K. (2000) *AIP Conf. Proc.* 526, 763

Ibrahim A.I., Markwardt C.B., Swank J.H. et al. (2004) *ApJ*, 609, L21

Israel G. L., Covino S., Stella L., et al. (1999) *ApJ (Lett.)* 518, L107

Istomin Ya.N., Komberg B.V. (2000) *Astron. Rep.*, 44, 754

Istomin Ya.N., Sobyenin D.N. (2007) *Astron. Lett.*, 33, 660

Izvekova V.A., Kuzmin A.D., Malofeev V.M., Shitov Yu.P. (1981) *Ap&SS*, 488, 364

Johnston S. (2003) *MNRAS*, 340,L43

Kaplan D. L., van Kerkwijk M. H. (2009) *ApJ*, 692, L62

Kaplan D.L., Kulkarni S.R., van Kerkwijk M.H. (2002) *ApJ*, 579, L29

Kaplan D.L., Kulkarni S.R., van Kerkwijk M.H. (2003a) *ApJ*, 588, L33

Kaplan D.L., van Kerkwijk M.H., Marshall H.L. et al. (2003b) *ApJ*, 590, 1008

Kaplan, D. L., van Kerkwijk, M. H. (2005) *ApJ*, 635, L65

Kargaltsev O.Y., Pavlov G.G., Zavlin V.E., Romani R.W. (2005) *ApJ*, 625, 307

Kaspi V. M., Gavriil F. P., Woods P. M. (2002) *ApJ*, 588, L93

Kazbegi A., Machabeli G., Melikidze G. (1992) *Proc. IAU Colloquium*, 128, 232

Keane E.F., Ludovici D.A., Eatough R.P. et al. (2010) *MNRAS*, 401, 1057

Kern B., Martin C. (2002) *Nature*, 418, 211

Kondratiev V.I., Burgay M., Possenti A. et al. (2008) *AIP Conf. Proc.*, 983, 348

- Kondratiev V.I., McLaughlin M.A., Lorimer D.R. et al. (2009) *ApJ*, 702, 692
- Kramer M., Lyne A. G., O'Brien J. T., et al. (2006) *Science*, 312, 549
- Kramer M., Stappers B.W., Jessner A. et al. (2007) *MNRAS*, 377, 101
- Kuiper L., Hermsen W., den Hartog P. R., Collmar W. (2006) *ApJ*, 645, 556
- Kuzmin A.D., Ershov A.A. (2006) *AstL*, 32, 583
- Lazaridis K., Jessner A., Kramer M. et al. (2008) *MNRAS*, 390, 839
- Lorimer D. R., Lyne A. G., Camilo F. (1998) *A&A*, 331, 1002
- Lyne A.G., Smith F.G., Graham D.A. (1971) 153, 337
- Malofeev V.M., Gil J.A., Jessner A. et al (1994) *A&A*, 285, 201
- Malofeev V. M., Malov O. I. (1997) *Nature*, 389, 697
- Malofeev V. M., Malov O.I. (2000), *IAU Colloquium*, 177, 241
- Malofeev V. M., Malov O.I. (2001) *astro-ph/0106435*
- Malofeev V. M., Malov O. I., Teplykh D. A., (2004) *IAU Symp. no. 218*, 261
- Malofeev V.M., Malov O.I., Teplykh D.A., Glushak A.P. (2005) *ATel. #501*
- Malofeev V.M., Malov O.I., Teplykh D.A. (2006) *Chin. J. Astron. Astrophys.*, 6,
68
- Malofeev V.M., Malov O.I., Teplykh D.A. (2007) *Ap&SS*, 308, 211

- Marsden D., Lingenfelter R.E., Rotshild R.E. et al. (2001) ApJ, 550, 397
- Mazets E.P., Golenetskii S. V., Ilinskii V. N. et al. (1979) Nature, 282, 587
- Mazets, E.P., Golenetskii, S.V. (1981) Ap&SS, 75, 47
- McGill SGR/AXP Online Catalog (<http://www.physics.mcgill.ca/~pulsar/magnetar/main.html>)
- McLaughlin M.A., Stairs I.H., Kaspi V.M. et al. (2003) ApJ, 591, L135
- McLaughlin M.A., Lyne A.G., Lorimer D. R. et al. (2006) Nature, 439, 817
- McLaughlin M.A., Rea N., Gaensler B.M. et al. (2007) ApJ, 670, 1307
- McLaughlin M.A., Lyne A.G., Keane E.F. et al. (2009) MNRAS, 400, 1431
- Mereghetti S., Stella L. (1995) ApJ, 442, L17
- Mereghetti S. (1999) astro-ph/9911252.
- Molkov S.V., Lutovinov A. A., Cherepashchuk A. M., Sunyaev R. A. (2004) AstL, 30, 534
- Motch C., Haberl F. (1998) A&A, 333, L59
- Pacini F. (1967) Nature, 216, 567
- Paerels F. (1997) ApJ, 476, L47
- Patel S. K., Kouveliotou C., Woods P.M. et al. (2001) ApJ, 563, L45

- Pavlov G.G., Sanwal D., Teter M.A. (2004) *Astron. Soc. of the Pacific, IAU Symp*, 218, 311
- Popov M.V., Stappers B. (2007) *A&A*, 470,1003
- Popov S. B., Colpi M., Prokhorov M. E. et al. (2003) *A&A*, 406, 111
- Pynzar A.V. (2007) *Astron. Astrophys. Trans.*, 26, 605
- Rea N., Torres M.A.P., Jonker P.G. et al. (2007) *MNRAS*, 379, 1484
- Rea N., Curto G.Lo, Testa V. et al. (2010) *MNRAS*, 407, 1887
- Reach W. T., Helles C., Koo B. (1993) *ApJ*, 412, 127
- Revnivtsev M. G. Sunyaev R. A., Varshalovich D. A. et al., (2004) *AstL*, 30, 382
- Ritchings R.T. (1976) *MNRAS*, 176, 249
- Shearer A., Golden A., Harfst S. et al. (1997) *ApJ*, 487, L181
- Shibanov Yu.A., Zharikov S.V., Komarova V.N. et al. (2006) *A&A*, 448, 313
- Shitov Yu.P.; Pugachev V.D. (1998) *Proc. of the International Conference on Neutron Stars and Pulsars*, 24, 247
- Shitov Yu.P., Pugachev V.D., Kutuzov S.M. (2002) *Proc. of the 177th Colloquium of the IAU, ASP Conference Series*, 202, 685
- Stappers B. W., Hessels J. W. T., Alexov A. et al. (2011) *A&A*, 530, id.A80
- Taylor J. H., Cordes J.M. (1993) *ApJ*, 411, 674

- Teplykh D. A. (2009) In: IV Gamow International Conference, p. 30
- Teplykh D. A., Malofeev V. M., Logvinenko S. V. (2009) In: 16th Open Young Scientists' Conference, p.25
- Trepl L., Hui C.Y., Cheng K.S. et al. (2010) MNRAS, 405, 1339
- Treves A., Turolla R., Zane S., Colpi M. (2000) Astron. Soc. of the Pacific, 112, 297
- van Kerkwijk M. H., Kaplan D. L. (2008) ApJ, 673, L163
- Walter F.M., Wolk S.J., Neuhauser R. (1996) Nature, 379, 233
- Walter F. M., Matthews L.D. (1997) Nature, 389, 358
- Wang Zh., Chakrabarty D., Kaplan D.L., (2006) Nature, 440, 772
- Weltevrede P., Stappers B.W., Rankin J.M., Wright G.A.E. (2006) ApJ, 645, L149
- Zampieri L., Campana S., Turolla R. et al. (2001) A&A, 378, L5
- Zane S., Cropper M., Turolla R. et al. (2005) ApJ, 627, 397
- Zane S., Mignani R.P., Turolla R. et al. (2008) ApJ, 682, 487
- Zhang B. (2001) ApJ, 562, L59