

На правах рукописи
УДК 524.354.4; 524.3-13:52-75

КОМАРОВА Виктория Николаевна

**РАДИОПУЛЬСАРЫ И ИХ ОКРУЖЕНИЕ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ
ИССЛЕДОВАНИЙ В ОПТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ**

(специальность 01.03.02 — астрофизика, радиоастрономия)

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Специальной Астрофизической Обсерватории РАН

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
в.н.с. **Шибанов Ю.А.**
(ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН)

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор **Гнедин Ю.Н.** (ГАО РАН);
доктор физико-математических наук,
Тихонов Н.А. (САО РАН)

Ведущая организация: Пушчинская Радиотрономическая
Обсерватория АКЦ ФИАН

Защита состоится 18 октября 2007 г. в 9 часов
на заседании диссертационного совета Д002.203.01 при Специальной
Астрофизической Обсерватории РАН по адресу: 396167, САО РАН,
пос. Нижний Архыз, Карачаево-Черкесская республика

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке САО РАН.

Автореферат разослан 15 сентября 2007 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д002.203.01
кандидат физико-математических наук

Майорова Е.К.

Общая характеристика работы

Диссертационная работа посвящена исследованию оптического излучения радиопульсаров и проявлений их взаимодействия с окружающей средой с помощью фотометрических и, в ряде случаев, спектральных наблюдений.

Актуальность темы диссертации

Открытие радиопульсаров [Hewish *et al.* 1968] ознаменовало появление нового направления в астрономии. Нейтронные звёзды (НЗ), предсказанные ещё в 1934 г. как объекты очень малого радиуса и высокой плотности, которые должны образовываться в конечной стадии эволюции массивных звёзд, стали предметом реальных наблюдательных исследований. Обнаружение пульсаров в остатках сверхновых в Крабовидной туманности и в созвездии Парусов послужило свидетельством образования НЗ при взрывах сверхновых. В 1971 г. были открыты рентгеновские пульсары, и вскоре стало общепринятым, что пульсары – это быстровращающиеся сильно-замагниченные НЗ. Радиопульсары относятся к подклассу изолированных НЗ (ИНЗ). Они не испытывают влияния аккреции вещества с обычного звёздного компонента, даже если радиопульсар находится в двойной звёздной системе. Радиопульсары (РП) излучают, в основном, за счёт нетепловых процессов в магнитосфере НЗ, источником энергии которых является вращение звезды. Они являются также эффективными поставщиками высокоэнергичных частиц в окружающую среду. У ряда РП обнаружено тепловое излучение с поверхности остывающей НЗ. Наблюдательные проявления, строение и эволюция НЗ определяются исключительными физическими условиями (сверхъядерные плотности, сверхсильные магнитные и гравитационные поля, сверхтекучесть барионной компоненты вещества в недрах НЗ и др.), что делает их уникальными природными лабораториями по изучению свойств вещества в экстремальных условиях, недостижимых на Земле. Однозначной теории многих из этих свойств пока не существует и основным методом исследований является сравнение предсказываемых разными теоретическими моделями наблюдательных проявлений с наблюдениями ИНЗ в различных диапазонах длин волн, включая оптический. Этим определяется актуальность темы данной диссертации.

К настоящему времени обнаружено более 1500 радиопульсаров. Сравнительно небольшую долю среди них составляют объекты, излучение которых детектируется также в гамма, рентгеновском и далёком ультрафиолетовом диапазонах [Ulmer 1998; Becker & Trümper 1999; Possenti *et al.* 2002; Korpela & Bowyer 1998; Kaspi *et al.* 2006]. В оптическом диапазоне обнаружено толь-

ко девять РП [Mignani 2005]. Большинство из них, за исключением молодых пульсаров в Крабовидной туманности и PSR B0540-69, являются слабыми оптическими объектами. Лишь достаточно яркий пульсар в Крабовидной туманности сравнительно полно изучен с помощью фотометрии, спектроскопии и поляриметрии, в том числе, и с высоким временным разрешением. Для остальных проводились только фотометрические наблюдения в ограниченном наборе спектральных полос, преимущественно в голубой области видимого диапазона или ближнем ультрафиолете. Эти данные не позволяли делать определённых выводов о характере и механизмах оптического излучения НЗ, о закономерностях эволюции спектров с возрастом, о различиях между оптическим излучением РП и «радиомолчащих» ИНЗ, и т.д. Появление наземных оптических телескопов нового поколения, таких как VLT¹ и Subaru², придало новый импульс этим исследованиям.

Природа оптического излучения радиопульсаров до сих пор не совсем ясна. По-видимому, его свойства частично определяются возрастом НЗ. Для молодых объектов, таких, как пульсар в Крабовидной туманности или PSR B0540-69, доминирующим является излучение нетепловой природы, которое образуется в магнитосфере НЗ. С увеличением возраста и замедлением вращения пульсара нетепловая компонента ослабевает, и тогда возможно проявление тепловой компоненты излучения с поверхности остывающей НЗ, которая наблюдается у ряда средневозрастных (10^5 – 10^6 лет) радиопульсаров в рентгеновском диапазоне. Оптические наблюдения позволяют уточнить параметры тепловой компоненты со стороны Релей-Джинсовской области спектра и прояснить природу нетепловой компоненты, спектральный индекс которой может меняться при переходе от одного диапазона к другому. Актуальным является также поиск возможных эмиссионных/абсорбционных деталей в спектрах НЗ, например, связанных с циклотронным излучением или поглощением плазмы в магнитосфере или атмосфере НЗ. Последнее даёт возможность прямого измерения магнитного поля НЗ и/или места локализации плазмы, ответственной за спектральные особенности, относительно поверхности НЗ.

В ряде случаев спектральные особенности в красной области оптических спектров радиопульсаров могут быть связаны с наличием $\text{H}\alpha$ -туманности, являющейся результатом взаимодействия пульсарного ветра релятивистских частиц с межзвёздной средой. Размеры и геометрия таких пульсарных туманностей определяются как характеристиками самой НЗ (её пространственной скоростью и темпом потерь энергии вращения), так и параметрами окру-

¹четыре 8-метровых телескопа Южно-Европейской Обсерватории

²8.2-метровый телескоп Национальной Японской Обсерватории

жающей среды. Исследования полей НЗ в области линии $H\alpha$ (6563\AA) и обнаружение таких туманностей, позволят продвинуться в понимании структуры ударных волн, обусловленных взаимодействием движущейся со сверхзвуковой скоростью НЗ с её окружением, и оценить как параметры и составляющие пульсарного ветра, так и межзвёздной среды. Это придает оптическим исследованиям радиопульсаров дополнительную актуальность.

Цели и задачи работы

1. Поиск и обнаружение оптического излучения радиопульсаров.
2. Изучение распределения энергии в оптических спектрах радиопульсаров с помощью фотометрических и, по возможности, спектральных исследований.
3. Сравнение особенностей оптического излучения радиопульсаров с данными в других диапазонах.
4. Поиск и изучение туманностей пульсарного ветра, результата взаимодействия движущихся высокоэнергетичных НЗ с межзвёздной средой, по наблюдениям в линии $H\alpha$.
5. Исследование кинематики вещества туманностей пульсарного ветра.

Научная новизна

Работа основывается на оригинальных наблюдениях пульсаров на телескопах БТА САО РАН, VLT, HST и Subaru.

- Впервые обнаружено излучение пульсара Геминга в I_c -полосе, впервые надёжно измерены его потоки в инфракрасном диапазоне.
- Впервые получен оптический спектр для пульсара B0656+14.
- Старый пульсар B0950+08 впервые детектирован в ряде полос оптического диапазона, впервые получены надёжные оценки потоков излучения в фильтрах V , R и I_c .
- Впервые в оптическом диапазоне проведены глубокие широкополосные наблюдения полей PSR J0108-1134, J1908+0734, B2334+61, J0454+5543, B0823+26 и даны верхние оценки на потоки их оптического излучения.
- Впервые проведены многополосные ($BVRI$) наблюдения поля пульсара B1951+32 в ядре остатка сверхновой СТВ 80, определены цвета протяжённого объекта, совпадающего по координатам с пульсаром.
- Впервые проведены кинематические исследования околопульсарной области ядра СТВ 80 с помощью интерферометра Фабри-Перо.

- Впервые проведены наблюдения поля PSR B1133+16 в полосах **B**, **R** и **H α** , обнаружены кандидат в оптические «двойники» пульсара и признаки туманности пульсарного ветра.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Обнаружение излучения средневозрастного пульсара Геминга в фильтре **I_c**, определение и существенное уточнение потоков его излучения в других полосах, исследование многоволнового спектра и вывод о его немонотонности (различных механизмах излучения в разных диапазонах).
2. Существенное уточнение потоков излучения PSR B0656+14 в диапазонах от ультрафиолетового до ближнего инфракрасного. Определение его оптического спектра, подтверждающего вывод о немонотонности распределения энергии в этом диапазоне.
3. Определение потоков излучения PSR B0950+08 в оптическом диапазоне и вывод о том, что в оптическом излучении этого старого пульсара преобладает нетепловая компонента.
4. Обнаружение возможных оптических кандидатов для высокоскоростного пульсара B1133+16 и **H α** -туманности, результата взаимодействия пульсарного ветра с окружающей средой.
5. Определение глубоких верхних пределов на поток оптического излучения от пульсаров J0108-1134 и J1908+0734.
6. Обнаружение корреляции эффективностей излучения в оптическом и рентгеновском диапазонах для 7-ми пульсаров, детектированных в этих областях спектра.

Научная и практическая ценность работы

Экспериментальные данные, полученные в работе, пригодны для непосредственного сравнения с теоретическими моделями и с результатами других экспериментов. Результаты данной работы могут применяться для теоретического моделирования спектров нейтронных звёзд в оптическом диапазоне и формы головной ударной волны для **H α** -туманностей пульсарного ветра, а также для планирования дальнейших более детальных наблюдений.

Апробация работы и публикации

В основу диссертации легли результаты, докладывавшиеся на семинарах и конкурсах научных работ САО РАН, на семинарах сектора теоретической

астрофизики ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН. Они также были представлены на международных и всероссийских конференциях:

Physics of Neutron Stars – 99 (С.-Петербург, 1999),
Joint European and National Astronomical Meeting (Москва, 2000),
Physics of Neutron Stars – 2001 (С.-Петербург, 2001),
Всероссийская Астрономическая Конференция (С.-Петербург, 2001),
International Workshop “Pulsars, AXP’s and SGRs observed with BeppoSAX and Other Observatories” (Италия, Марсала, 2002),
Всероссийская конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра» (Москва, 2003),
35th COSPAR Scientific Assembly (2004),
Physics of Neutron Stars – 2005 (С.-Петербург, 2005),
Meeting “ISOLATED NEUTRON STARS: FROM THE INTERIOR TO THE SURFACE” (Лондон, 2006).

Основное содержание диссертации опубликовано в 8-ми печатных работах (общим объёмом 83 страницы) и в материалах 9-ти конференций, перечисленных в конце автореферата. Все статьи написаны в коллективе соавторов.

Личный вклад автора

- Участие в постановке задачи, выбор объектов для исследования, подготовка заявок на наблюдения (на Subaru и VLT совместно Ю.А. Шибановым и С.В. Жариковым).
- Фотометрические наблюдения на БТА САО РАН проводились автором, спектральные данные получены при непосредственном участии.
- Редукция фотометрических и спектральных данных, полученных на БТА САО РАН (за исключением данных ИФП), обработка прямых изображений с Subaru параллельно с А.Б.Копцевичем, фотометрия и длиннощелевая спектроскопия данных с VLT при участии С.В. Жарикова.
- Работа с каталогом пульсаров ATNF и литературными данными об излучении РП в других диапазонах для выявления закономерностей и/или связи между их излучением в разных областях спектра.
- Интерпретация результатов совместно с Ю.А. Шибановым и С.В. Жариковым.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из 6-и глав, включая введение и заключение, списка публикаций автора, списков литературы, иллюстраций и таблиц. Объём

диссертации составляет 173 страницы печатного текста, в том числе 46 иллюстраций и 36 таблиц. Список литературы насчитывает 225 наименований.

Основное содержание диссертации

Вводная глава к диссертации содержит краткий обзор по изучаемому предмету, где описаны характерные особенности НЗ, наблюдательные проявления этих объектов и их взаимодействия с межзвездной окружающей средой, представлены существующие результаты по наблюдениям в разных диапазонах. Обоснована актуальность исследований оптического излучения радиопульсаров, перечислены цели и задачи данной работы и приведены основные параметры объектов исследования.

В **главе 1** освещены **методические вопросы** изучения оптического излучения радиопульсаров. **Разд. 1.1** содержит информацию о телескопах и приборах, на которых проводились наблюдения. Методические вопросы, такие, как редукция данных, астрометрическая привязка, фотометрическая процедура и особенности методов фотометрии слабых объектов освещены в **разд. 1.2**. В **разд. 1.3** сказано о спектральных наблюдениях и приложениях для обработки полученных данных.

Глава 2 посвящена исследованию оптического излучения (ОИ) радиопульсаров. В **разделе 2.1** речь идёт о наблюдениях оптического «двойника» средневозрастного пульсара **Геминга** и полученных результатах. Приведена история более ранних исследований этого объекта, открытого в гамма-диапазоне как яркий источник неизвестной природы [Fichtel *et al.* 1975], который спустя много лет был отождествлен с источником пульсирующего излучения в рентгеновском диапазоне [Halpern & Holt 1992]. Регулярные пульсации с тем же периодом были обнаружены в γ -диапазоне [Bertsch *et al.* 1992]. В результате многочисленных наблюдений Геминги на разных телескопах (CFHT, ESO 3.6 m, NTT, 5 m Hale, HST) удалось отождествить эту НЗ в оптике и осуществить ее многоцветную фотометрию [Bignami *et al.* 1988; Halpern & Tytler 1988; Bignami *et al.* 1996]. Следует отметить также маргинальное детектирование пульсирующей компоненты оптического излучения Геминги [Shearer *et al.* 1998]. В **подразд. 2.1.1** представлены результаты исследований оптического излучения Геминги с помощью **BVRI**-фотометрии по наблюдениям на 6 м телескопе БТА САО РАН. Полученные величины **B** ($26^m1 \pm 0.5$), **V** ($25^m3 \pm 0.3$) и **R_c** ($25^m4 \pm 0.3$) согласуются с результатами других исследований излучения этой НЗ в видимой области спектра. В этих наблюдениях Геминга впервые была отождествлена на пределе обнаруже-

ния в I_c -полосе с оценкой величины $25^m1 \pm 0.4$, что более чем на величину ярче верхнего предела из литературных данных [Mignani *et al.* 1998b]. В ходе дальнейшего изучения оптического «двойника» пульсара в полосах B , R_c и I_c по данным, полученным на Subaru, отождествление Геминги в фильтре I_c было подтверждено со значительно более высоким уровнем достоверности ($I_c = 25^m10 \pm 0.14$) и были существенно уточнены потоки в фильтрах B и R . Эти наблюдения, их редукция и полученные результаты описаны в подразд. 2.1.2. При построении широкополосного спектра Геминги в рассмотрение был включён наблюдательный материал из архивов телескопов NTT/ESO и HST, полученный в широком диапазоне частот, от ближнего ИК до ультрафиолетовой области спектра. Его описание и сведения о редукции представлены в подразд. 2.1.3. В подразд. 2.1.4 обсуждается

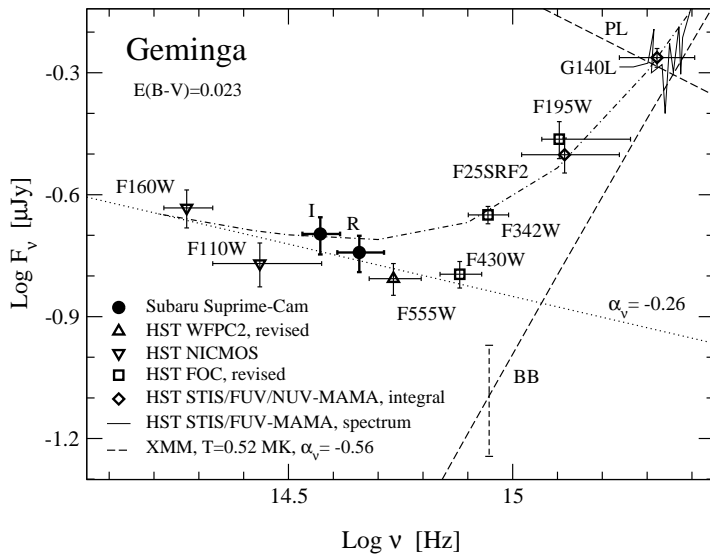


Рис. 1: Исправленный за покраснение широкополосный спектр Геминги от ближнего ИК до УФ, по результатам всех наблюдений этого пульсара на разных телескопах и инструментах. Тонкой сплошной линией показаны спектральные данные, полученные в дальнем УФ [Kargaltsev *et al.* 2005]. Штриховые линии соответствуют продолжению в область низких энергий исправленной за поглощение мягкой чернотельной (BB) и степенной (PL) спектральных компонент, определённых из аппроксимаций рентгеновских спектральных данных. Параметры аппроксимаций взяты из работы Kargaltsev *et al.* [2005]. Пунктирная линия и линия "штрих-пунктир" показывают аппроксимацию оптических данных в диапазоне от $F160W$ до $F430W$ степенным законом (PL) и её сумму с чернотельной компонентой BB, соответственно.

детектирование Геминги в I_c -полосе, дана сводка всех использованных данных и приведены полученные нами при их редукции оценки величин и потоков Геминги. Вопросы поправок за межзвёздное поглощение обсуждаются в подразд. 2.1.5. Исправленный за покраснение широкополосный спектр Геминги (см. Рис. 1) представлен в подразд. 2.1.6.

В разделе 2.2 представлены результаты широкополосных исследований излучения PSR B0656+14. Как и Геминга, этот средневозрастной (10^5 лет) пульсар активно изучался в различных диапазонах длин волн, от радио до γ -лучей. В видимой области спектра PSR B0656+14 надёжно отождествлён по совпадению координат источника с положением РП и по заметному собственному движению, присущему нейтронным звездам [Mignani *et al.* 1997; 2000; Brisken *et al.* 2003]. Кроме того, найдены пульсации излучения

PSR B0656+14 с тем же периодом, что и в радиодиапазоне, в оптической области спектра [Shearer *et al.* 1997; Kern *et al.* 2003] и в ультрафиолете [Shibanov *et al.* 2005]. Фотометрические исследования PSR B0656+14 проводились на HST в полосе F555W и в ближнем УФ диапазоне (см. Pavlov *et al.* [1996; 1997]; Mignani *et al.* [1998a]), а также в полосах **B**, **V**, **R**, **I** на 6-метровом телескопе [Kurt *et al.* 1998]. При анализе изображений в ближнем ИК диапазоне из архива HST были измерены потоки пульсара в полосах **F187W**, **F160W**, **F110W** [Koptsevich *et al.* 2001]. В подразд. **2.2.1** описаны проведённые для уточнения потоков излучения наблюдения PSR B0656+14 в полосах **B**, **V** и **R** на телескопе Subaru в 2001 г. и редукция полученных данных. Результаты широкополосных наблюдений PSR B0656+14 обсуждаются в подразд. **2.2.2**, где представлены все использованные для построения широкополосного спектра данные и приведены оценки потоков PSR B0656+14. Полученный спектр представлен в подразд. **2.2.3**. Он, в основном, плоский, с избытками в ближнем ИК и ближнем УФ диапазонах. При наблюдениях PSR B0656+14 на телескопе VLT/UT1 ESO со спектрографом FORS2 в 2004-2005 гг. получен спектр низкого разрешения в диапазоне 4300-9600Å. Условия наблюдений, конфигурация аппаратуры и редукция данных описаны в подразд. **2.2.4**, куда также включён анализ полученных данных и обсуждение результатов. В целом, распределение энергии в спектре соответствует результатам широкополосной фотометрии. Эмиссионных или абсорбционных линий в полученном спектре не выявлено, но нельзя полностью исключить наличие широких и слабых спектральных особенностей. Континуум исправленного за поглощение спектра в диапазоне 4600-7000Å имеет степенную форму $f \sim \nu^{-0.2 \pm 0.2}$, что подтверждает нетепловую природу основной части ОИ.

Раздел 2.3 посвящён исследованиям излучения **PSR B0950+08**. Этот старый (17×10^6 лет) пульсар был также надёжно отождествлен в рентгеновском диапазоне [Seward & Wang 1988; Cordova *et al.* 1989; Manning & Willmore 1994]. Однако достоверность отождествления НЗ с оптическим кандидатом, предложенным по наблюдениям на телескопе HST в ближнем ультрафиолете [Pavlov *et al.* 1996], долгое время вызывала сомнения (из-за невысокой точности астрометрической привязки). В 2001 г. были проведены наблюдения PSR B0950+08 в фильтре **B** на Subaru. Использование уточнённого значения собственного движения пульсара [Briskin *et al.* 2002] и нового астрометрического каталога USNO позволило надёжно отождествить этот объект на полученном изображении, о чём подробно рассказано в подразд. **2.3.1**. Величина пульсара в фильтре **B** по наблюдениям на Subaru составляет $B=27.04 \pm 0.15$, а поток излучения, соответственно, 0.060 ± 0.009 мкЯн.

Изучение ОИ PSR B0950+08 было продолжено с помощью широкополосной **UBVRI** фотометрии по данным, полученным на FORS1/VLT ESO. Эти наблюдения и их редукция описаны в **подразд. 2.3.2**, там же приведены и результаты. **Подразд. 2.3.3** содержит их анализ и обсуждение. Подтверждено полученное на Subaru значение потока от пульсара в полосе **B** и впервые обнаружено его излучение в фильтрах **V, R** и **I_c** и измерены величины: **B=27^m06±0.35**, **V =27^m05±0.15**, **R_c=26^m49±0.10** и **I_c=26^m20±0.17**. Это позволило впервые построить широкополосный спектр объекта.

В **разделе 2.4** речь идёт о поиске оптического «двойника» старого **PSR B1133+16**. Высокая пространственная скорость пульсара (**631±30 км/с**) делает его хорошим кандидатом и для поиска пульсарной туманности – результата сверхзвукового движения НЗ сквозь межзвёздную среду. Обнаружение такой туманности служит дополнительным аргументом при отождествлении НЗ в оптическом диапазоне. При наблюдениях на Chandra/ACIS в диапазоне 0.5 – 8 кэВ [Kargaltsev *et al.* 2006] PSR B1133+16 был обнаружен как слабый объект, с потоком на уровне $8 \pm 2 \times 10^{-15}$ эрг с⁻¹ см⁻², что согласуется с оценкой рентгеновской светимости по эмпирическому закону $L_x \approx 10^{-3} \dot{E}$ [Becker & Truemper 1997]. По нашим оценкам светимость PSR B1133+16 в **B**-полосе должна быть $\sim 5 \times 10^{26}$ эрг/с и соответствующая звёздная величина – **27^m7**. Все эти соображения высказаны в **подразд. 2.4.1**. Для поиска пульсара в оптическом диапазоне были использованы изображения поля PSR B1133+16 в фильтре **B** из архива VLT, полученные в 2001 г., и в 2003-2004 гг. проведены глубокие наблюдения на FORS1/VLT ESO в фильтрах **B, R** и линии **H α** . Эти данные и их редукция описаны в **подразд. 2.4.2** и **2.4.3**. **Подразд. 2.4.4** содержит информацию о результатах поиска. Обнаружены слабый кандидат в оптические «двойники» пульсара (**B =28.0±0.2**, **R > 27.7**) и некоторые признаки туманности в полосе **H α** . В **подразд. 2.4.5** приведено обсуждение результатов и следующих из их анализа выводов. Полученная для найденного оптического объекта светимость соответствует величинам, ожидаемым для пульсаров возраста 10⁶-10⁷ лет. Если это действительно НЗ, эффективность преобразования энергии её вращения в ОИ сравнима с величинами, характерными для молодых пульсаров, в Крабовидной туманности и PSR B0540-69.

Раздел 2.5 описывает глубокие наблюдения полей пульсаров J0108-1134, J1908+0734 и др., в которых желаемая цель нахождения новых оптических отождествлений РП не достигнута. Приведены краткие сведения о каждом объекте, детали наблюдений и редукции данных и определённые для каждого пульсара предельные звёздные величины. Сделаны заключения о перспективах дальнейших наблюдений.

Глава 3 посвящена сравнению излучения исследованных РП в разных диапазонах и поиску связи и закономерностей эволюции наблюдаемых характеристик. В **разделе 3.1** представлены результаты анализа спектрального распределения энергии ОИ «средневозрастных» PSR B0656+14 и Геминги, а также старого PSR B0950+08 (**подразд. 3.1.1 и 3.1.2**, соответственно), а также обсуждается спектральная эволюция ОИ с возрастом пульсара. В **разделе 3.2** приведены многоволновые спектры этих объектов (по всем доступным данным). Их анализ позволяет предположить нетепловую природу ОИ пульсаров среднего и старого возраста. Возможные механизмы ОИ средневозрастных пульсаров рассматриваются в **разделе 3.3**. Сравнение оптического и рентгеновского участков спектра PSR B0656+14 показывает, что потоки ОИ согласуются с продолжением степенной компоненты из рентгеновского диапазона в оптический. Это свидетельствует о возможной общности механизмов генерации оптического и рентгеновского излучения пульсара и может служить объяснением природы избытка его спектра в ближнем ИК диапазоне. В **разделе 3.4** представлены выводы, полученные в ходе анализа и сравнения светимостей L в разных диапазонах для 7-ми пульсаров, изученных в оптическом диапазоне³, с надёжными оценками расстояния и эффективностей преобразования потерь энергии вращения \dot{E} в нетепловое излучение ($\eta = L/\dot{E}$). Для рассмотренной выборки РП эффективность преобразования потерь энергии вращения в нетепловое излучение растёт с возрастом во всех диапазонах. Этот вывод подтверждается и для выборки в более чем 500 РП из каталога ATNF. Зависимости эффективностей в различных диапазонах от потерь энергии вращения НЗ указывают на единый процесс преобразования L_{sd} в наблюдаемое излучение для пульсаров среднего возраста на всех длинах волн. Эффективности оптического и рентгеновского излучения РП сильно коррелированы ($\eta = 0.97$), поэтому наиболее вероятно, что их природа одинакова.

В **главе 4** рассматривается ещё одно направление исследований активности пульсаров – поиск и изучение пульсарных туманностей, являющихся результатом взаимодействия пульсарного ветра с окружающей межзвёздной средой, которые наблюдаются в виде структур различной морфологии в рентгеновском диапазоне и/или линии $H\alpha$.

Раздел 4.1 посвящён исследованию туманности «Гитара» – результата взаимодействия с межзвёздной средой одного из самых быстро движущихся из известных пульсаров B2224+65 (тангенциальная скорость > 800 км/с). Описаны результаты наблюдений пульсарной туманности «Гитара» на наземных телескопах и космическом телескопе им. Хаббла. В **подразд. 4.1.2**

³Три из них, пульсары среднего и старого возраста Геминга, B0656+14 и B0950+08, в рамках данной работы

представлены результаты нашего исследования «Гитары». На БТА САО РАН получены глубокие $H\alpha$ -изображения этого поля, снят спектр низкого разрешения околопульсарной части туманности, с эмиссионными линиями бальмеровской серии. Анализ результатов и выводы приведены в **подразд. 4.1.3**. Впервые, кроме линий $H\alpha$, $H\beta$, в спектре обнаружена $H\gamma$. Это позволило дать более жёсткую оценку для величины межзвёздного поглощения в направлении PSR B2224+65. Возможное обнаружение пульсарных туманностей при широкополосных наблюдениях Геминги и PSR B0656+14 на телескопе Subaru обсуждается в **разд. 4.2**. В **разд. 4.3** представлены результаты исследований поля многоволнового **пульсара B1951+32** в ядре остатка сверхновой **СТВ 80** в оптическом диапазоне. Изучение его пульсарной туманности, которая детектируется как в рентгеновском, так и в оптическом диапазоне, представляет огромный интерес для понимания кинематики и физики пульсарных туманностей. Дана подробная сводка результатов исследований поля PSR B1951+32, предшествовавших нашим. В **подразд. 4.3.1** представлены детали широкополосных наблюдений центральной части СТВ 80 на 6 м телескопе БТА САО РАН в 1999 г. и их редукция. В анализе использованы данные из архива HST в узких фильтрах **F656N** ($H\alpha$), **F502N** ([OIII]), **F673N** ([SII]) и среднеполосном **F547M**. В настоящей работе впервые проведены исследования кинематики пульсарной туманности в остатке сверхновой СТВ 80 с помощью интерферометра Фабри-Перо 6 м телескопа САО РАН. В **подразд 4.3.2** даны детали интерферометрических наблюдений окрестностей PSR B1951+32 и их редукции. Результаты исследований ядра СТВ 80 представлены в **подразд 4.3.3**. Проведена самая глубокая на настоящее время **BVRI**-фотометрия этого поля, обнаружен объект с пекулярными цветами, по координатам совпадающий с положением пульсара. Из анализа изображения поля PSR B1951+32 в фильтре **F547M** очевидно, что этот объект не является звездообразным. В результате наблюдений с ИФП, кроме известного ранее расширения системы ярких волокон со скоростью 100–200 км/с, обнаружены слабые высокоскоростные детали линии $H\alpha$, по крайней мере, вплоть до скоростей 400 – 450 км/с. Впервые по исследованию кинематики пульсарной туманности и из анализа ее морфологии в линиях $H\alpha$, [SII], [OIII] по данным архива космического телескопа им. Хаббла оценена возможная пространственная скорость пульсара – 500 км/с.

В **Заключении** суммируются основные результаты и выводы диссертационной работы. Отмечены элементы новизны, практическая ценность, апробация, указан личный вклад автора и дан список публикаций по теме диссертации.

Основные результаты и выводы диссертационной работы.

1. Обнаружено излучение средневозрастного пульсара Геминга в фильтре **I** на телескопе БТА и в ближнем ИК диапазоне на телескопе им. Хаббла (HST). Измерены потоки оптического излучения этого пульсара по наблюдениям в широких полосах в диапазоне от ультрафиолета до ближней ИК области на телескопах БТА, Subaru и космическом телескопе HST. Построен его многоволновой спектр.

2. По измерениям в широких полосах в ультрафиолетовом, оптическом и ближнем инфракрасном диапазонах на телескопах HST, БТА и Subaru уточнены потоки оптического излучения средневозрастного пульсара PSR B0656+14. Впервые получен спектр пульсара, подтверждающий немонотонность распределения энергии в оптическом диапазоне, что может быть связано с циклотронным поглощением на электронах/позитронах в верхних слоях магнитосферы пульсара.

3. Определены потоки излучения PSR B0950+08 в оптическом диапазоне и сделан вывод о том, что в оптическом излучении этого старого пульсара преобладает нетепловая компонента.

4. Проведены фотометрические наблюдения поля PSR B1951+32 в ядре остатка сверхновой СТВ 80, определены величины и цвета протяжённого объекта, совпадающего по координатам с положением пульсара, сделано предположение о нетепловой природе излучения и связи этого объекта с пульсаром.

5. В наблюдениях с интерферометром Фабри-Перо исследована кинематика вещества ядра остатка сверхновой СТВ 80 в окрестности пульсара. Впервые обнаружены высокоскоростные слабоконтрастные эмиссионные детали туманности. Впервые по исследованию кинематики пульсарной туманности и из анализа ее морфологии в линиях $H\alpha$, [SII], [OIII] по данным архива телескопа HST оценена возможная пространственная скорость пульсара – 500 км/с.

6. Обнаружен возможный оптический кандидат для высокоскоростного пульсара B1133+16 и признаки $H\alpha$ -туманности, результата взаимодействия пульсарного ветра с окружающей средой.

8. Получен спектр околопульсарной части $H\alpha$ -туманности «Гитара», результата взаимодействия пульсара B2224+65 с межзвездной средой; впервые обнаружена линия $H\gamma$.

9. Обнаружена корреляция эффективностей излучения в оптическом и рентгеновском диапазонах для 7-ми пульсаров, детектированных в этих областях спектра.

10. Сделан вывод о возможной немонотонности зависимости эффектив-

ностей преобразования потерь энергии вращения пульсаров в нетепловое излучение от возраста.

Публикации по теме диссертации

1) 2000, Bulletin SAO, 49, 5 V.G. Kurt, V.N. Komarova, T.A. Fatkhullin, V.V. Sokolov, A.B. Koptsevich, Ya.A. Shibano, “Photometric study of fields of nearby pulsars with the 6m telescope”

2) 2001, Bulletin SAO, 51, 21 V.G. Kurt, V.N. Komarova, V.V. Sokolov, T.A. Fatkhullin, A.B. Koptsevich, Yu.A. Shibano, “Multiband photometry of Geminga”

3) 2002, A&A, 394, 633 Zharikov, S. V.; Shibano, Yu. A.; Koptsevich, A. B.; Kawai, N.; Urata, Y.; Komarova, V. N.; Sokolov, V. V.; Shibata, S.; Shibasaki, N. “Subaru optical observations of the old pulsar PSR B0950+08”

4) 2004, A&A, 417, 1017 Zharikov, S. V.; Shibano, Yu. A.; Mennickent, R. E.; Komarova, V. N.; Koptsevich, A. B.; Tovmassian, G. H. “Multiband optical observations of the old PSR B0950+08”

5) 2005, ПАЖ, 31, 4, 269 Лозинская Т.А., Комарова В.Н., Моисеев А.В., Блинные С.И., «Новые наблюдения пульсарной туманности в остатке сверхновой СТВ80»

6) 2006, AdSpR, 37, 10, 1979 S. Zharikov, Yu. Shibano and V. Komarova “Radiation efficiencies of the pulsars detected in the optical range”

7) 2006, A&A, 448, 313 Shibano, Y. A.; Zharikov, S. V.; Komarova, V. N.; Kawai, N.; Urata, Y.; Koptsevich, A. B.; Sokolov, V. V.; Shibata, S.; Shibasaki, N. “Subaru optical observations of the two middle-aged pulsars PSR B0656+14 and Geminga”

8) 2007, Astrophysics and Space Science, Proceedings of “Isolated Neutron Stars: from the Interior to the Surface”, eds. D. Page, R. Turolla and S. Zane Zharikov, S., Mennickent, R. E., Shibano, Yu., Komarova, V., “Optical spectroscopy of the radio pulsar PSR B0656+14”

Тезисы конференций

9) 1999, Physics of Neutron Stars – 99, Programme and Abstracts, 38, Комарова В. Н, Курт В.Г., Соколов В.В., Жариков С.В. «ПЗС-наблюдения пульсаров среднего возраста на 6 м телескопе САО РАН» 10) 2000, Abstracts of JENAM-2000, 96, V.N. Komarova, V.G. Kurt, A.B. Koptsevich, Ya.A. Shibano, T.A. Fatkhullin, V.V. Sokolov, “Photometric investigation of the fields of nearby pulsars with the 6 m telescope of SAO RAS”

11) 2000, Abstracts of JENAM-2000, 99, Yu. A. Shibano, A. B. Koptsevich, V.V. Sokolov, S.V. Zharikov, G.G. Pavlov, V.G. Kurt, V.N. Komarova, “Optical photometry of the PSR B0656+14 and its neighbourhood”

- 12) 2001, Abstracts of the Conference on Physics of Neutron Stars, 24, (astro-ph/0106435), V.N. Komarova, V.G. Kurt, T.A. Fatkhullin, V.V. Sokolov, Yu.A. Shibarov, A.B. Koptsevich, “Multiband photometry of Geminga”
- 13) 2001, Тезисы докладов ВАК-2001, 94, В.Н. Комарова, В.Г. Курт, В.В. Соколов, Ю.А. Шибанов, “Фотометрические исследования центральной области СТВ 80”
- 14) 2001, Тезисы докладов ВАК-2001, 95, В.Н. Комарова, В.Г. Курт, Ю.А. Шибанов, А.Б. Копцевич, Т.А. Фатхуллин, В.В. Соколов, “Исследования оптического излучения Геминги”
- 15) 2003, Pulsars, AXP's and SGRs observed with BeppoSAX and Other Observatories, Proceedings of the International Workshop held in Marsala, September 23-25, 2002. Edited by G. Cusumano, E. Massaro, T. Mineo. Roma, Italy: Aracne Editrice, July 2003, 71, Zharikov, S.; Mennickent, R.; Shibarov, Yu.; Koptsevich, A.; Tovmassian, G.; Komarova, V., “Multiband optical observations of the PSR B0950+08”
- 16) 2003, Pulsars, AXP's and SGRs observed with BeppoSAX and Other Observatories, Proceedings of the International Workshop held in Marsala, September 23-25, 2002. Edited by G. Cusumano, E. Massaro, T. Mineo. Roma, Italy: Aracne Editrice, July 2003, 77, Komarova, V.; Shibarov, Yu.; Zharikov, S.; Koptsevich, A.; Kawai, N.; Urata, Y.; Sokolov, V. V.; Shibata, S.; Shibasaki, N., “Optical Studies of PSR J0633+1746 and PSR B0656+14 with Subaru”
- 17) 2003, Тезисы докладов Всероссийской конференции «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра», 13, Комарова В.Н., Шибанов Ю.А., Жариков С.В., «Фотометрические исследования оптического излучения пульсаров»
- 18) 2003, Тезисы докладов Всероссийской конференции «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра», 13, Комарова В.Н., Курт В.Г., Шибанов Ю.А., «Окрестности пульсара B1951+32 в оптике»
- 19) 2004, Proceedings of 35th COSPAR Scientific Assembly, 1914, Zharikov, S., Shibarov, Yu., Komarova, V., “Radiation efficiencies of the pulsars detected in the optical range”
- 20) 2005, Physics of Neutron Stars – 2005, Book of Abstracts, 48 V.N. Komarova, T.A. Fatkhullin, V.G. Kurt, Yu.A. Shibarov, “Optical studies of neutron stars and their surroundings at the 6m telescope of SAO RAS”
- 21) 2007, Zharikov, S., Mennickent, R., Shibarov, Yu., Komarova, V., “Possible optical detection of a fast moving nearby radio pulsar PSR B1133+16”, A&A (сдана в печать).

Цитируемая литература

- W. Becker & J. Truemper, *Astron. Astrophys.*, **326**, 682 (1997)
- W. Becker & J. Trümper, *Astron. Astrophys.*, **341**, 803 (1999)
- D. L. Bertsch, K. T. S. Brazier, C. E. Fichtel, R. C. Hartman, S. D. Hunter, G. Kanbach, D. A. Kniffen, P. W. Kwok, Y. C. Lin, & J. R. Mattox, *Nature*, **357**, 306 (1992)
- G. F. Bignami, P. A. Caraveo, R. Mignani, J. Edelstein, & S. Bowyer, *Astrophys. J. Letters*, **456**, L111 (1996)
- G. F. Bignami, P. A. Caraveo, & J. A. Paul, *Astron. Astrophys.*, **202**, L1 (1988)
- W. F. Brisken, J. M. Benson, W. M. Goss, & S. E. Thorsett, *Astrophys. J.*, **571**, 906 (2002)
- W. F. Brisken, S. E. Thorsett, A. Golden, & W. M. Goss, *Astrophys. J. Letters*, **593**, L89 (2003)
- F. A. Cordova, J. Middleditch, R. M. Hjellming, & K. O. Mason, *Astrophys. J.*, **345**, 451 (1989)
- C. E. Fichtel, R. C. Hartman, D. A. Kniffen, D. J. Thompson, H. Ogelman, M. E. Ozel, T. Tumer, & G. F. Bignami, *Astrophys. J.*, **198**, 163 (1975)
- J. P. Halpern & S. S. Holt, *Nature*, **357**, 222 (1992)
- J. P. Halpern & D. Tytler, *Astrophys. J.*, **330**, 201 (1988)
- A. Hewish, S. J. Bell, J. D. Pilkington, P. F. Scott, & R. A. Collins, *Nature*, **217**, 709 (1968)
- O. Kargaltsev, G. G. Pavlov, & G. P. Garmire, *Astrophys. J.*, **636**, 406 (2006)
- O. Y. Kargaltsev, G. G. Pavlov, V. E. Zavlin, & R. W. Romani, *Astrophys. J.*, **625**, 307 (2005)
- V. M. Kaspi, M. S. E. Roberts, & A. K. Harding, *Isolated neutron stars*, pp. 279–339, Compact stellar X-ray sources (2006)
- B. Kern, C. Martin, B. Mazin, & J. P. Halpern, *Astrophys. J.*, **597**, 1049 (2003)
- A. B. Koptsevich, G. G. Pavlov, S. V. Zharikov, V. V. Sokolov, Y. A. Shibanov, & V. G. Kurt, *Astron. Astrophys.*, **370**, 1004 (2001)
- E. J. Korpela & S. Bowyer, *Astron. J.*, **115**, 2551 (1998)

- V. G. Kurt, V. V. Sokolov, S. V. Zharikov, G. G. Pavlov, & B. V. Komberg, *Astron. Astrophys.*, **333**, 547 (1998)
- R. A. Manning & A. P. Willmore, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **266**, 635 (1994)
- R. Mignani, P. A. Caraveo, & G. F. Bignami, *The Messenger*, **87**, 43 (1997)
- R. Mignani, P. A. Caraveo, & G. F. Bignami, *Advances in Space Research*, **21**, 197 (1998a)
- R. P. Mignani, in *NATO ASIB Proc. 210: The Electromagnetic Spectrum of Neutron Stars*, eds. A. Baykal, S. K. Yerli, S. C. Inam, & S. Grebenev, p. 133 (2005)
- R. P. Mignani, P. A. Caraveo, & G. F. Bignami, *Astron. Astrophys.*, **332**, L37 (1998b)
- R. P. Mignani, A. De Luca, & P. A. Caraveo, *Astrophys. J.*, **543**, 318 (2000)
- G. G. Pavlov, G. S. Stringfellow, & F. A. Cordova, *Astrophys. J.*, **467**, 370 (1996)
- G. G. Pavlov, A. D. Welty, & F. A. Cordova, *Astrophys. J. Letters*, **489**, L75 (1997)
- A. Possenti, R. Cerutti, M. Colpi, & S. Mereghetti, *Astron. Astrophys.*, **387**, 993 (2002)
- F. D. Seward & Z.-R. Wang, *Astrophys. J.*, **332**, 199 (1988)
- A. Shearer, A. Golden, S. Harfst, R. Butler, R. M. Redfern, C. M. M. O'Sullivan, G. M. Beskin, S. I. Neizvestny, V. V. Neustroev, V. L. Plokhotnichenko, M. Cullum, & A. Danks, *Astron. Astrophys.*, **335**, L21 (1998)
- A. Shearer, R. M. Redfern, G. Gorman, R. Butler, A. Golden, P. O'Kane, G. M. Beskin, S. I. Neizvestny, V. V. Neustroev, V. L. Plokhotnichenko, & M. Cullum, *Astrophys. J. Letters*, **487**, L181 (1997)
- Y. A. Shibano, J. Sollerman, P. Lundqvist, T. Gull, & D. Lindler, *Astron. Astrophys.*, **440**, 693 (2005)
- M. P. Ulmer, in *Neutron Stars and Pulsars: Thirty Years after the Discovery*, ed. N. Shibasaki, p. 319 (1998)

Бесплатно

Виктория Николаевна Комарова

Радиопульсары и их окружение по результатам исследований в оптическом диапазоне.