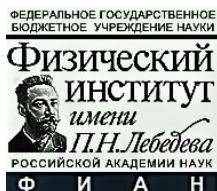


Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук «ФИАН»



На правах рукописи

Тимиркеева Мария Андреевна

**Исследование особенностей радиопульсаров,
излучающих в гамма- и рентгеновском диапазонах**

Специальность 01.03.02 —
«астрофизика и звездная астрономия»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2022

Работа выполнена в Филиале "Пушкинская радиоастрономическая обсерватория им. В.В. Виткевича АКЦ ФИАН" Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н.Лебедева РАН.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Малов Игорь Федорович

Официальные оппоненты: **Самусь Николай Николаевич**,
доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт астрономии
РАН,
ведущий научный сотрудник

Боговалов Сергей Владимирович,
доктор физико-математических наук,
Национальный исследовательский ядерный
университет «МИФИ»,
профессор

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Физико-технический
институт им. А.Ф. Иоффе РАН

Защита состоится 13 сентября 2022 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 002.023.01 на базе Физического института им. П.Н. Лебедева РАН по адресу: г. Москва, улица Профсоюзная, д. 84/32, Институт космических исследований РАН, зал семинаров – к. 707.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физического института им. П.Н. Лебедева РАН по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53. Автореферат и диссертация в электронном виде представлены на сайтах ФИАН <http://www.lebedev.ru> и <http://www.asc-lebedev.ru> в разделе "Диссертационный совет".

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53, ФИАН (АКЦ), ученому секретарю диссертационного совета Д 002.023.01.

Автореферат разослан июля 2022 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 002.023.01,
канд. физ.-мат. наук



Шахворостова Н.Н.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. С момента открытия пульсаров прошло более 50 лет, неугасающий поток работ по этой теме говорит о важности исследования этих объектов: ежегодно появляется более тысячи посвященных им публикаций, раз в несколько лет происходит открытие нового класса астрономических объектов. Интенсивные наблюдения ведутся в радио-, оптическом, рентгеновском и гамма-диапазонах. Несмотря на неостывающий интерес, многие области исследования пульсаров остаются плохо изученными. Это относится не только к классификации пульсаров, которая меняется со временем, подстраиваясь под новые данные, но и к механизму генерации радио, рентгеновского и гамма-излучения, который остается не до конца понятным даже после пятидесяти лет постоянных исследований радиоастрономами всего мира. До сих пор нет единого мнения о структуре магнитосферы, ее эволюции, о локализации области генерации жесткого излучения.

Важнейшим этапом научных исследований в любой отрасли знания является классификация изучаемых объектов. Поэтому в течение более 50 лет, протекавших с момента открытия пульсаров [1], делались попытки выделить группы или классы объектов, различающиеся по наблюдаемым параметрам либо по совокупности измеряемых параметров этих объектов. Описание предлагавшихся схем классификации пульсаров и ссылки на оригинальные работы можно найти в обзоре [2]. В данной работе делается еще одна попытка выявить различия в распределениях наблюдаемых и вычисленных параметров пульсаров. Установление четких отличий пульсаров разных классов и понимание физических причин, вызывающих наблюдаемые отличия, - один из основных путей к решению вопросов, связанных с происхождением, строением, механизмами излучения и эволюцией пульсаров.

Для последующего анализа были сформированы четыре группы изолированных нейтронных звёзд: в первой наблюдается только импульсное радиоизлучение, во второй - кроме радиоизлучения зарегистрировано гамма-излучение (гамма-громкие радиопульсары), третья группа состоит из радиопульсаров с зарегистрированным рентгеновским излучением, четвертая - гамма-пульсары без зарегистрированного радиоизлучения (радио-тихие гамма-пульсары).

Цель данной работы заключалась в сравнении параметров, описывающих физические условия в исследуемых пульсарах - периодов, их производных, светимостей в трех диапазонах энергий, скоростей потери энергии вращения, магнитных полей на поверхности и на световом цилиндре и на основе такого сравнения установить локализацию генерации жёсткого излучения в магнитосфере пульсара и механизм его генерации.

Обнаружение радиоизлучения от гамма-пульсара с большими значениями скоростей потери энергии и магнитного поля на световом цилиндре и исследование его характеристик также является целью данной работы.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Построить сравнительные гистограммы для четырех групп пульсаров.
2. Сравнить полученные распределения параметров.
3. Исследовать различия в существующих выборках.
4. Составить список кандидатов из всей популяции радиопулсаров, от которых можно зарегистрировать гамма-излучение.
5. Составить список гамма-пульсаров, как потенциальных источников периодического радиоизлучения.
6. Провести наблюдения гамма-пульсара, который потенциально должен излучать в радиодиапазоне на частоте 111 МГц.

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

1. Впервые детально проанализировано отличие радио-тихих гамма-пульсаров и рентгеновских радиопулсаров от популяции обычных радиопулсаров. Результаты исследования были опубликованы в работах А1-А6.
2. Впервые составлен каталог радиопулсаров, как возможных источников гамма-излучения с оценкой ожидаемой гамма-светимости. Результат исследования был опубликован в работе А4.
3. Впервые определены кандидаты среди гамма-пульсаров, как источников потенциального радиоизлучения. Результат исследования был опубликован в работе А4.
4. Показано, что жесткое излучение генерируется на периферии магнитосферы за счет синхротронного механизма. Результат исследования был опубликован в работе А5.
5. Впервые получена верхняя оценка плотности потока на частоте 111 МГц для гамма-пульсара J1836+5925. Результат исследования был опубликован в работе А7.

Научная и практическая значимость В ходе выполнения работы были построены распределения основных физических параметров по большей выборке для четырех групп пульсаров, были сформулированы два критерия для поиска жесткого излучения от известных радиопулсаров, представлен каталог ожидаемых гамма-пульсаров, даны оценки ожидаемой гамма-светимости, сформирован список кандидатов из гамма-пульсаров без зарегистрированного, но ожидаемого радиоизлучения, доказано, что генерация жесткого излучения происходит на периферии магнитосферы за счет синхротронного механизма.

Полученные результаты могут быть использованы для наблюдения на радиотелескопах конкретных гамма-источников, которые являются потенциальными радиопульсарами. Также представлен список радиопульсаров, как ожидаемо сильных источников гамма-излучения.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Проведен сравнительный анализ наблюдаемых и вычисленных параметров четырех групп пульсаров. По результатам анализа сделан вывод о том, пульсары с зарегистрированным жестким излучением обладают более сильными магнитными полями на световом цилиндре и более высокой скоростью потерь энергии вращения (порядка 10^4 Гс и 10^{35} эрг/сек), чем характерные значения (10^2 Гс и 10^{32} эрг/сек) у обычных радиопульсаров.
2. Составлен каталог радиопульсаров, от которых можно ожидать заметного гамма-излучения, и гамма-пульсаров, как потенциальных источников периодического радиоизлучения.
3. Показано, что жесткое излучение генерируется на периферии магнитосферы за счет синхротронного механизма.
4. Дана верхняя оценка плотности потока на частоте 111 МГц для гамма-пульсара J1836+5925.

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением строгих математических методов для анализа полученных распределений. Результаты находятся в соответствии с результатами, полученными другими авторами [3-7] на меньших выборках или на сопоставимых, как указано в работе [8].

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на научной сессии АКЦ ФИАН в 2014 году, на XII и XIII съездах Международной общественной организации "Астрономическое общество" и приуроченных к ним научным конференциям "Астрономия от ближнего космоса до космологических далей" и "Астрономия - 2018", а также на следующих Всероссийских и Международных конференциях:

1. Всероссийская астрофизическая конференция "Астрофизика высоких энергий" (Москва, ИКИ, декабрь 2013 г.)
2. 43-я Международная студенческая научная конференция (Екатеринбург, Коуровская астрономическая обсерватория, февраль 2014 г.)
3. III Международная молодежная научная школа-конференция (Москва, МИФИ, апрель 2014 г.)
4. Всероссийская астрофизическая конференция "Астрофизика высоких энергий" (Москва, ИКИ, декабрь 2014 г.)

5. 44-я Международная студенческая научная конференция (Екатеринбург, Коуровская астрономическая обсерватория, февраль 2015 г.)

6. VI Всероссийская конференция по фундаментальным и инновационным вопросам современной физики (Москва, ФИАН, ноябрь 2015 г.)

7. 45-я Международная студенческая научная конференция (Екатеринбург, Коуровская астрономическая обсерватория, февраль 2016 г.)

8. Международная астрономическая конференция "Физика звезд: от коллапса до коллапса"(п. Нижний Архыз, САО РАН, октябрь 2016 г.)

9. Всероссийская астрофизическая конференция "Астрофизика высоких энергий"(Москва, ИКИ, декабрь 2016 г.)

10. 46-я Международная студенческая научная конференция(Екатеринбург, Коуровская астрономическая обсерватория, февраль 2017 г.)

11. XXXIV Всероссийская конференция "Актуальные проблемы внегалактической астрономии"(Пушино, ПРАО АКЦ ФИАН, апрель 2017 г.)

12. Международная конференция "Physics of Neutron Stars – 2017"(Санкт-Петербург, июль 2017 г.)

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

14. Всероссийская астрофизическая конференция "Астрофизика высоких энергий"(Москва, ИКИ, декабрь 2017 г.)

15. 47-я Международная студенческая научная конференция (Екатеринбург, Коуровская астрономическая обсерватория, февраль 2018 г.)

16. XXXV Всероссийская конференция "Актуальные проблемы внегалактической астрономии"(Пушино, ПРАО АКЦ ФИАН, апрель 2018 г.)

17. VII Международная молодежная научная школа-конференция (Москва, МИФИ, апрель 2018 г.)

18. 48th Young European Radio Astronomers Conference (Dwingeloo, Голландия, сентябрь 2018 г.)

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

20. VIII Международная молодежная научная школа-конференция (Москва, МИФИ, апрель 2019 г.)

21. 25-я Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых (Ласпи/КРАО, Крым, апрель 2019 г.)

22. 49th Young European Radio Astronomers Conference (Dublin, Ирландия, август 2019 г.)

23. Всероссийская конференции "Современная звездная астрономия — 2019" (п. Нижний Архыз, САО РАН, октябрь 2019 г.)

24. Третья астрометрическая конференция-школа "Астрометрия вчера, сегодня, завтра" (Москва, ГАИШ, октябрь 2019 г.)

25. Всероссийская астрофизическая конференция "Астрофизика высоких энергий" (Москва, ИКИ, декабрь 2019 г.)

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

27. Всероссийская астрономическая конференция "Астрономия в эпоху многоканальных исследований" (Москва, ГАИШ, август 2021 г.)

Личный вклад.

Во всех выносимых на защиту результатах и опубликованных работах личный вклад диссертанта является существенным. Диссертант в работах А1-А5 совместно с соавтором участвовал в постановке исследовательских задач, выборе методов их решения, анализе полученных данных, обсуждении результатов и формулировке выводов работы. Вклад диссертанта в работы А6 и А7 являлся определяющим.

Результаты вычислений, представленные в таблицах 1, 2, 3, 4, 5 и 6, получены диссертантом самостоятельно. Все рисунки в опубликованных работах и в диссертационной работе подготовлены также самостоятельно диссертантом.

Публикации. Все результаты диссертационной работы опубликованы в рецензируемых журналах и сборниках трудов научных конференций. Всего опубликовано 26 научных работ [А1-А7, Б1-Б21, С1-С2], включая тезисы докладов научных конференций [Б1-Б21] и 2 статьи по результатам работы съездов Международной общественной организации "Астрономическое общество" [С1-С2]. Основные результаты диссертационной работы,

выносимые на защиту, изложены в 7 статьях [A1-A7] в рецензируемых журналах, входящих в международные базы цитирования Web of Science и удовлетворяющие требованиям ВАК.

A1. Малов И.Ф., Тимиркеева М.А. Особенности радиопульсаров с излучением вне радиодиапазона // *Астрономический журнал*. — 2014. — том 91, № 9. — С. 705–712

A2. Малов И.Ф., Тимиркеева М.А. Сравнение параметров радиотихих и радиогромких гамма-пульсаров // *Астрономический журнал*. — 2015. — том 92, № 9. — С. 742–750

A3. Malov I. F., Timirkееva M. A. Peculiarities in the emission of radio-loud and radio-quiet gamma pulsars and gamma-quiet radio pulsars // *ASP Conference Series: Stars: from Collapse to Collapse*. — 2017. — Vol. 510, — Pp. 498–499

A4. Malov I. F., Timirkееva M. A. Radio pulsars with expected gamma radiation and gamma-ray pulsars as pulsating radio emitters // *Research in Astronomy and Astrophysics*. — 2018. — Vol. 18, no. 8. — Pp. 89-1–89-9

A5. Malov I. F., Timirkееva M. A. On X-ray emission of radio pulsars // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2019. — Vol. 485, no. 4. — Pp. 5319–5328

A6. Timirkееva M. A., Malov I. F. Radio loud and radio quiet pulsars with hard emission // *Astrophysics and Space Science*. — 2020. — Vol. 365, no. 12. — Pp. 190-1–190-6

A7. Timirkееva M., Malov I., Malofeev V., Malov O. Observations of the gamma-ray pulsar J1836+5925 at 111 MHz // *Open Astronomy*. — 2021. — Vol. 30, no. 1. — Pp. 119–121

B1. Кочеткова М.А.¹, Малов И.Ф. Особенности радиопульсаров с излучением вне радиодиапазона. // Тезисы докладов конференции "Астрофизика высоких энергий". — Москва, 2013. — С. 51.

B2. Кочеткова М.А. Особенности радиопульсаров с излучением вне радиодиапазона. // Труды конференции "43-ая Международная студенческая научная конференция". — Екатеринбург, 2014. — С. 185.

¹девичья фамилия диссертанта

Б3. *Тимиркеева М.А., Малов И.Ф.* Особенности радиопульсаров с излучением вне радиодиапазона. // Тезисы докладов конференции "III Международная молодежная научная школа-конференция". — Москва, поля2014. — С. 68.

Б4. *Малов И.Ф., Тимиркеева М.А.* Сравнение параметров радиотихих и радиогромких гамма-пульсаров. // Тезисы докладов конференции "Астрофизика высоких энергий". — Москва, 2014. — С. 54.

Б5. *Тимиркеева М.А.* Сравнение параметров радиотихих и радиогромких гамма-пульсаров. // Труды конференции "44-ая Международная студенческая научная конференция". — Екатеринбург, 2015. — С. 165.

Б6. *Тимиркеева М.А.* Сравнение параметров радиотихих и радиогромких гамма-пульсаров. // Труды конференции "VI Всероссийская конференция по фундаментальным и инновационным вопросам современной физики". — Москва, 2015. — С. 149.

Б7. *Тимиркеева М.А.* Особенности излучения радиогромких и радиотихих гамма-пульсаров и гамма-тихих радиопульсаров. // Труды конференции "45-ая Международная студенческая научная конференция". — Екатеринбург, 2016. — С. 203.

Б8. *Малов И.Ф., Тимиркеева М.А.* Особенности излучения радиогромких и радиотихих гамма-пульсаров и гамма-тихих радиопульсаров. // Тезисы докладов конференции "Астрофизика высоких энергий". — Москва, 2016. — С. 57.

Б9. *Тимиркеева М.А.* К вопросу о поиске радио- и гамма-излучения от пульсаров. // Труды конференции "46-ая Международная студенческая научная конференция". — Екатеринбург, 2017. — С. 222.

Б10. *Малов И.Ф., Тимиркеева М.А.* К вопросу о поиске радио- и гамма-излучения от пульсаров. // Тезисы докладов XXXIV Всероссийская конференция "Актуальные проблемы внегалактической астрономии". — Пушино, 2017. — С. 36.

Б11. *Malov I. F., Timirkeeva M. A.* On the search for gamma emission from known radio pulsars and radio emission from known gamma- pulsars. // Book of abstracts at the conference "Physics of Neutron Stars". — St. Petersburg, 2017. — P. 126.

Б12. *Малов И.Ф., Тимиркеева М.А.* О поиске гамма-излучения от известных радио-пульсаров и радиоизлучения от гамма-пульсаров. // Тезисы докладов Всероссийской астрономической конференции "Астрономия: познание без границ". — Ялта, 2017. — С. 146.

Б13. *Тимиркеева М.А.* Радиопульсары с ожидаемым гамма-излучением и гамма-пульсары в радиодиапазоне. // Труды конференции "47-ая Международная студенческая научная конференция". — Екатеринбург, 2018. — С. 235-236.

Б14. *Тимиркеева М.А.* К вопросу о поиске радио- и гамма-излучения от пульсаров. // Тезисы докладов XXXV Всероссийская конференция "Актуальные проблемы внегалактической астрономии". — Пушино, 2018. — С. 12.

Б15. *Тимиркеева М.А., Малов И.Ф.* К вопросу о поиске гамма-излучения от известных радио-пульсаров и радиоизлучения от гамма-пульсаров. // Тезисы докладов конференции "VII Международная молодежная научная школа-конференция". — Москва, 2018. — С. 300–301.

Б16. *Тимиркеева М.А., Малов И.Ф.* О рентгеновском излучении радиопульсаров. // Сборник тезисов Всероссийской конференции "Современная звездная астрономия — 2018". — Москва, 2018 г. — С. 213.

Б17. *Тимиркеева М.А., Малов И.Ф.* О рентгеновском излучении радиопульсаров. // Тезисы докладов конференции "VIII Международная молодежная научная школа-конференция". — Москва, 2019. — С. 193–194.

Б18. *Тимиркеева М.А., Малов И.Ф.* О рентгеновском излучении радиопульсаров. // Тезисы докладов XXV ВНКСФ. — Севастополь, 2019 — С. 290–291.

Б19. *Тимиркеева М.А., Малов И.Ф.* О рентгеновском излучении радиопульсаров. // Тезисы докладов Всероссийской конференции "Современная звездная астрономия — 2019". — п. Нижний Архыз, САО РАН, 2019 г. — С. 98.

Б20. *Тимиркеева М.А., Малов И.Ф.* О рентгеновском излучении радиопульсаров. // Тезисы докладов Третьей астрометрической конференции-школы "Астрометрия вчера, сегодня, завтра" — Москва, ГАИШ, 2019. — С. 26.

B21. *Timirkееva, M., Malov, I., Malov, O* Observations of the Gamma-Ray Pulsar J1836+5925 at 111 MHz. // Proceedings of the All-Russian Conference "Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century" — Nizhny Arkhyz, SAO RAS, 2020. — Pp. 541–454.

C1. *Malov I. F., Timirkееva M. A.* Peculiarities in the emission of radio-loud and radio-quiet gamma pulsars and gamma-quiet radio pulsars // *Astronomical and Astrophysical Transactions* по результатам работы съезда Международной общественной организации "Астрономическое общество". — Москва, 2016.

C2. *Малов И.Ф., Тимиркеева М.А.* О рентгеновском излучении радиопульсаров // Сборник тезисов конференции "Астрономия - 2018"(XIII Съезд Международной общественной организации "Астрономическое общество"). — Москва: ИЗМИРАН, 2018. — С. 220–223

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. Полный объем диссертации составляет **117** страниц текста, включая **35** рисунков и 6 таблиц. Список литературы содержит **127** наименование.

Содержание работы

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

В **Первой главе** приведен анализ наблюдаемых и вычисленных параметров для четырех групп пульсаров: в первой наблюдается только импульсное радиоизлучение (R-пульсары), во второй - кроме радиоизлучения зарегистрировано гамма-излучение (гамма-громкие радиопульсары, γ +R -пульсары), третья группа состоит из радиопульсаров с зарегистрированным рентгеновским излучением (X+R -пульсары), четвертая - гамма-пульсары без зарегистрированного радиоизлучения (радио-тихие гамма-пульсары, γ -пульсары).

В качестве исходных данных использовались значения параметров, которые приведены в "ATNF Pulsar Catalogue"(далее ATNF каталог) [9], содержащем более 3000 пульсаров, большая часть из них наблюдается как радиопульсары. Для последующего анализа было отобрано ~ 1800 радиопульсаров без зарегистрированного рентгеновского и гамма-излучения. Из каталога ATNF были отобраны 52 радиопульсара, излучающие в

гамма-диапазоне, некоторые из них были зарегистрированы как рентгеновские источники. Детальные данные были получены для 61 радиопульсара, излучающего в рентгеновском диапазоне [10, 11] от 0.1 до 10 кэВ. Порядка трех сотен источников зарегистрированы как гамма-пульсары². Была сформирована выборка из 36 радио-тихих гамма-пульсаров, согласно каталогу "*Fermi Large Area Telescope Second Source Catalog*" (далее 2FGL каталог) [8]. На момент публикации работ диссертанта [12–14] это был самый точный каталог гамма-источников, в котором наиболее полно исследованы гамма-пульсары.

Для всех исследуемых групп из рассмотрения исключены пульсары, находящиеся в шаровых скоплениях и в двойных системах, поскольку их наблюдаемые характеристики могут быть подвержены искажениям вследствие влияния других, окружающих их звезд.

Были построены распределения периода, его производной, магнитного поля на поверхности нейтронной звезды (НЗ), скорости потери энергии вращения и магнитного поля на световом цилиндре.

В работах [12–17] было показано, что пульсары, обнаруженные как пульсирующие рентгеновские и гамма-источники, обладают высокими значениями магнитной индукции вблизи светового цилиндра ($\log B_{lc} \sim 10^4$ Гс), на два-три порядка превышающей величины индукции для радиопульсаров без зарегистрированного жесткого излучения ($\log B_{lc} \sim 10^2$ Гс). Кроме того, их скорости потери вращательной энергии также в среднем на три порядка выше ($\frac{dE}{dt} \sim 10^{34} \div 10^{35}$ эрг/сек) соответствующих значений для основной массы радиопульсаров ($\frac{dE}{dt} \sim 10^{32}$ эрг/сек).

Дана оценка согласованности распределений с помощью критерия Колмогорова-Смирнова.

Вторая глава посвящена анализу гистограмм распределения монохроматической радиосветимости, плотностей потока на частоте 1400 МГц, расстояния и пересчету условных светимостей в физические светимости L_r (эрг/с) на основе статистических зависимостей $L_r(R_{lum})$.

Распределение монохроматической радиосветимости хорошо описывается гауссовской зависимостью для радиопульсаров (рис. 1). Для радиогромких гамма-пульсаров явно намечается бимодальное распределение. В формулу

$$R_{lum1400} = S_{1400} \times d^2, \text{ мЯн} \times \text{кпк}^2 \quad (1)$$

входят два сомножителя: S_{1400} - плотность потока на частоте 1400 МГц - распределена почти по Гауссу (рис. 2), а вот расстояние от наблюдателя до пульсаров - d - показывает двугорбое распределение (рис. 3), таким образом становится очевидно, что радио-громкие гамма-пульсары разделены

²<https://confluence.slac.stanford.edu/display/GLAMCOG/Public+List+of+LAT-Detected+Gamma-Ray+Pulsars>

на две пространственные группы, расстояние между которыми составляет несколько килопарсек. Первая популяция удалена от нас на 0.2–0.6 кпк и находится, по-видимому, в рукаве Ориона, вторая – расположена на расстояниях от 2 до 18 кпк (при среднем значении 5.3 кпк) в удаленных от Солнца рукавах.

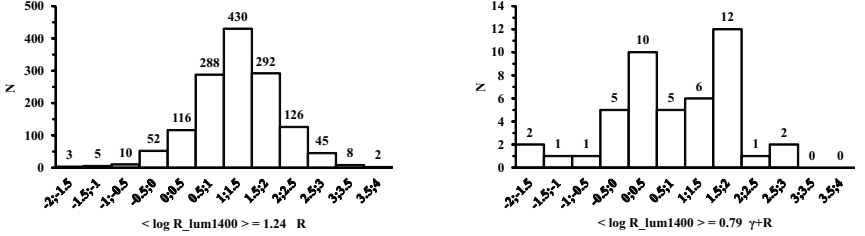


Рис. 1 — Распределение монохроматической радиосветимости на частоте 1400 МГц

Рисунки были получены диссертантом в работе [15]

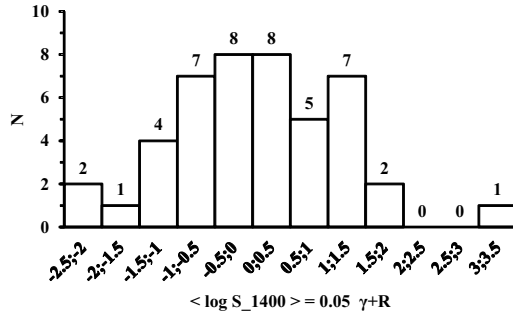


Рис. 2 — Распределение плотностей потока на 1400 МГц для радио-громких гамма-пульсаров

Рисунок был получен диссертантом в работе [15]

Для пересчета условных светимостей, вычисляемых по выше приведенной формуле для $R_{lum1400}$, в физические светимости L_r (эрг/с) использованы значения L_r из работы [18]. В этой работе получены зависимости L_r от R_{lum} для 311 пульсаров на частоте 400 МГц. В работе диссертанта используются каталожные светимости на 1400 МГц, поэтому необходимо получить новые уравнения, связывающие L_r и $R_{lum1400}$. В результате получаются зависимости, которые были представлены в работе [15]

$$\log L_r = (0.91 \pm 0.55) \log R_{lum1400} + 27.74 \pm 2.57 \quad (2)$$

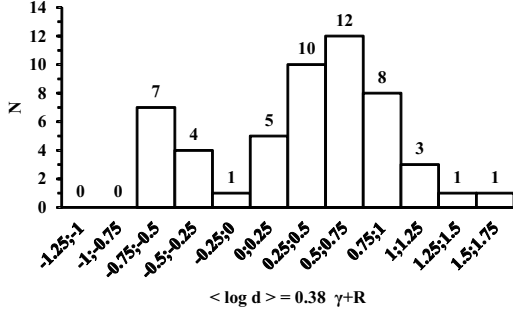


Рис. 3 — Распределение расстояний до радио-громких гамма-пульсаров
Рисунок был получен диссертантом в работах [13, 15]

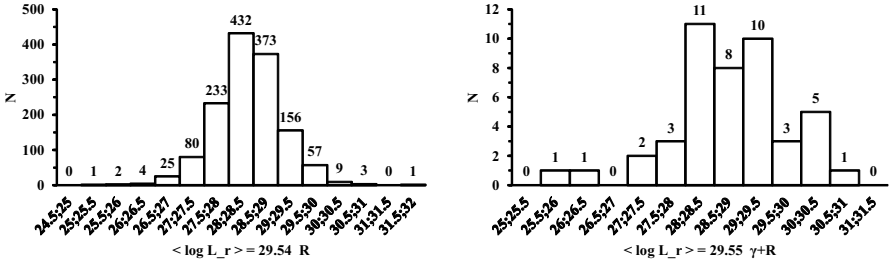


Рис. 4 — Распределение светимостей для радиопульсаров

Рисунки были получены диссертантом в работе [15]

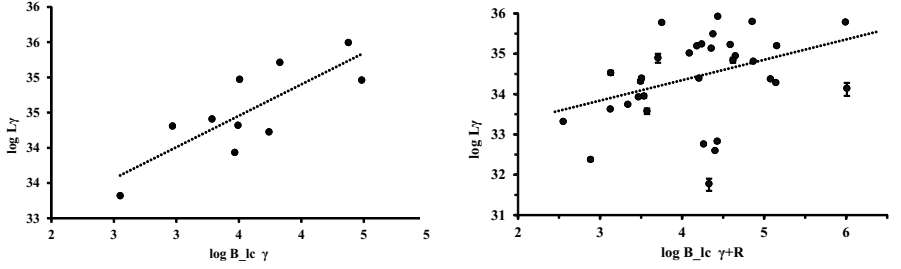
при коэффициенте корреляции $R = 0.77$ для пульсаров с $P < 0.1$ секунды, и

$$\log L_r = (0.97 \pm 0.33) \log R_{lum1400} + 28.38 \pm 0.49 \quad (3)$$

при коэффициенте корреляции $R = 0.56$ для пульсаров с $P > 0.1$ секунды.

Соответствующие распределения $N(L_r)$ для обычных радиопульсаров и радио-громких гамма-пульсаров представлены на рисунке 4. Оба эти распределения достаточно хорошо описываются гауссианами, и это подтверждает, что полученная на рисунке 3 бимодальность связана со множителем d^2 , т.е. с пространственной удаленностью объектов.

Высокие значения индукции магнитного поля на световом цилиндре в пульсарах с высокоэнергичным излучением заставляет предположить, что именно на периферии магнитосферы происходит генерация излучения в этом диапазоне. В окрестности светового цилиндра уменьшается отношение энергии магнитного поля к энергии плазмы, и у релятивистских частиц появляются заметные питч-углы [19], что приводит к включению



а) радио-тихие гамма-пульсары б) радио-громкие гамма-пульсары

Рис. 5 — Зависимость между гамма-светимостью пульсара и магнитным полем на световом цилиндре в двух группах пульсаров

Рисунки и зависимости были получены диссертантом в работах [12, 13] синхротронного механизма, мощность которого при любом распределении частиц по энергиям возрастает с увеличением магнитного поля:

$$P_s = \frac{2e^4 B^2 \sin^2 \Psi \gamma^2}{3m^2 c^3}, \quad (4)$$

здесь e - заряд электрона, m - его масса, γ - его лоренц-фактор, c - скорость света. Частота в максимуме синхротронного спектра:

$$\nu_{max} = \frac{0.9eB \sin \Psi \gamma^2}{4\pi mc} \quad (5)$$

тоже растёт с увеличением магнитного поля и при достаточно больших лоренц-факторах может попадать в гамма-диапазон. Формулы 4 и 5 описывают излучение единичного электрона, и количественные соответствия необходимо проверять для реальных распределений излучающих зарядов по энергии, которые до сих пор плохо изучены.

Предположение о генерации гамма-излучения на периферии магнитосферы пульсаров с жестким излучением, возникающее из наличия больших магнитных полей на световом цилиндре, подтверждается заметной корреляцией их гамма-светимости с величиной B_{lc} . На рисунке 5 зависимости $\log L_\gamma$ ($\log B_{lc}$) показаны отдельно для гамма-пульсаров без радиоизлучения и радио-громких гамма-пульсаров. Первая группа содержит 10 источников, вторая - 35. Из выборок исключены объекты, входящие в двойные системы и шаровые скопления.

Зависимость параметров для первой группы описывается уравнением:

$$\log L_\gamma = (0.89 \pm 0.53) \log B_{lc} + 31.32 \pm 4.3 \quad (6)$$

при коэффициенте корреляции $K = 0.80$ и вероятности случайного распределения $p < 0.037$. Для второй группы соответствующее уравнение имеет вид:

$$\log L_\gamma = (0.49 \pm 0.47) \log B_{lc} + 32.43 \pm 2.01 \quad (7)$$

Коэффициент корреляции для этой выборки равен 0.34, $p < 0.038$.

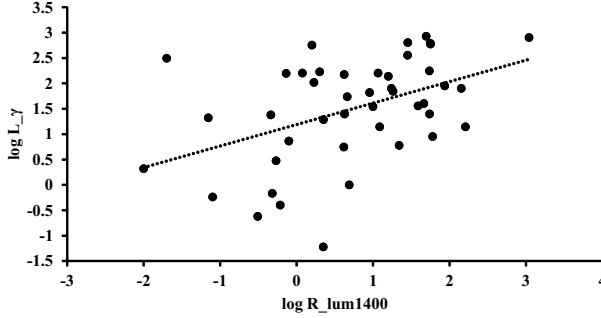


Рис. 6 — Зависимость гамма светимости пульсаров от их радиосветимости (прямая соответствует уравнению 8)

Рисунок и зависимость были получены диссертантом в работе [14]

Сравнивая каталожные монохроматические светимости в радио $R_{lum1400}$ с гамма-светимостями L_γ для 44 пульсаров из каталога [8], приходим к зависимости:

$$\log L_\gamma = (0.42 \pm 0.12) \log R_{lum1400} + (1.19 \pm 0.17) \quad (8)$$

при коэффициенте корреляции $K = 0.45$ и вероятности случайности распределения 2.5×10^{-3} . Значения L_γ напрямую брались из каталога 2FGL. Учитывая неопределённости в расстояниях и ширине диаграммы направленности, использованных при вычислении гамма-светимости L_γ , считаем приведенную зависимость значимой для использования её в дальнейшем.

Исследуя только пульсары с сильными магнитными полями на световом цилиндре и высокой скоростью потерь энергии вращения ($B_{lc} > 10^3$ Гс и $\frac{dE}{dt} > 3 \times 10^{34}$ эрг/сек), в **Третьей главе** были определены кандидаты из радиопулсаров в потенциальные гамма-источники - все предложенные пульсары из таблицы 5 являются радио-громкими пульсарами без зарегистрированного ранее высокоэнергичного излучения. В таблице 6 предложены для дальнейшего наблюдения в радиодиапазоне гамма-громкие пульсары, у которых до настоящего момента периодическое радиоизлучение не обнаружено.

Уравнение связи между светимостями в гамма-диапазоне в радиодиапазоне на частоте 1400 МГц было получено из уравнения 8 и переписано в виде:

$$\log R_{lum1400} = (0.47 \pm 0.15) \log L_\gamma + (0.03 \pm 0.26) \quad (9)$$

Были проведены наблюдения Геминга-подобного радио-тихого гамма-пульсара J1836+5925, о чем говорится также в **Третьей главе**, с целью обнаружения от него периодического радиоизлучения и определения меры дисперсии и расстояния для этого пульсара. Дана верхняя оценка плотности потока для пульсара J1836+5925.

По данным из работы [20], предельная чувствительность S_0 радиотелескопа БСА ФИАН при постоянной времени τ_0 , равной 0.10 с, изменяется от 0.10 до 0.14 Ян. Если принять за среднее значение $S_0 = 0.12$ Ян в вычислениях, то для сигнала в 5σ с использованием параметров наблюдения, верхний предел плотности потока равен $S_{max} \leq 82$ мЯн (см. уравнение 10, таблицу 1, рисунок 7), результаты были опубликованы в работе [24].

$$S_{max} \leq \frac{5 \times S_0 \times \sqrt{\frac{\tau_0}{\tau_{obs}}}}{\sqrt{N_{total}}} = \frac{5 \times 0.12 \text{ Ян} \times \sqrt{\frac{100}{2.458}}}{\sqrt{2178}} = 82 \text{ мЯн} \quad (10)$$

Были предприняты многочисленные попытки обнаружить радиоизлучение на других частотах - 350, 820 и 1400 МГц [21–23], сильного радиоизлучения от J1836+5925 не зарегистрировано. Авторами были получены верхние оценки плотности потока, которые также приведены в таблице 1.

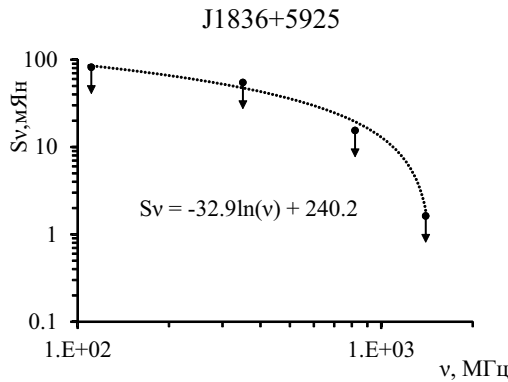


Рис. 7 — Радиоспектр пульсара J1836+5925
Рисунок был получен диссертантом в работе [24]

Таблица 1 — Радио параметры для построения радиоспектра пульсара J1836+5925

Частоты, МГц	Плотность потока, мЯн	Ссылки
111	< 82	[24]
350	< 55	[21]
820	< 14	[21]
820	< 17	[23]
1400	< 3	[21]
1400	< 0.25	[22]

Четвертая глава посвящена анализу зависимости рентгеновской светимости от скорости потери энергии вращения, также даётся объяснение генерации рентгеновского нетеплового излучения за счет синхротронного механизма.

Нетепловое излучение может быть объяснено появлением у релятивистских электронов заметного лоренц-фактора на периферии магнитосферы (вблизи светового цилиндра) и включением синхротронного механизма. В этом случае для рентгеновской светимости может быть получено следующее выражение [19]:

$$L_x \approx \frac{16\pi^8 e^4 R_*^6 I B_s^2 \gamma_r \Psi^2 \frac{dP}{dt} \sin^4 \beta}{m^3 c^{11} P^8}, \quad (11)$$

где R_* - радиус нейтронной звезды, I - момент инерции, B_s - индукция магнитного поля на поверхности нейтронной звезды, γ_r - лоренц-фактор излучающих частиц, Ψ - их питч-угол, β - угол между магнитным моментом нейтронной звезды, который предполагается совпадающим с осью конуса излучения, и осью вращения звезды. Используя полученное в работе [19] выражение для Ψ :

$$\Psi = \frac{1}{2} \left(\frac{3\pi^3 m^5 c^7 \gamma_b^3}{4e^6 B^4 P^3 \gamma_p^4 \gamma_r^2} \right), \quad (12)$$

можно рассчитать ожидаемые значения рентгеновской светимости, используя следующую формулу из работы [25]:

$$L_{calc} = \frac{\sqrt{3}\pi^{7/2} e I \frac{dP}{dt} \gamma_b^{3/2}}{32c^{3/2} P^{7/2} m^{1/2} \gamma_p^2} = 10^{27} \frac{\left(\frac{dP}{dt}\right)_{-15}}{P^{7/2}} \text{erg s}^{-1}. \quad (13)$$

В уравнениях 12 и 13 γ_b - это лоренц-фактор первичного пучка, а γ_p - лоренц-фактор рождённых в каскадных процессах вторичных зарядов. Детальной теории внешних областей магнитосферы пульсара не существует, и мы использовали в уравнении 13 предположение о дипольной структуре

магнитных полей на любом расстоянии. В этом случае зависимость L_{calc} от $\sin \beta$ исчезает. Однако, в реальной ситуации такая зависимость может появиться, и необходимо это учитывать. Предположение о дипольной структуре должно быть исправлено при разработке таких теорий. Действительно, многие авторы, начиная с работ [26] и [27], показали, что вблизи светового цилиндра структура магнитных полей может отличаться от дипольной (см. также работы Шитова [28, 29]).

Сравнение вычисленных и наблюдаемых значений рентгеновской светимости приведено на рисунке 8. Значения расчетной рентгеновской светимости приведены в последнем столбце таблицы 4, предполагая, что $\gamma_b = 5 \times 10^6$, $\gamma_p = 10$ для всех пульсаров.

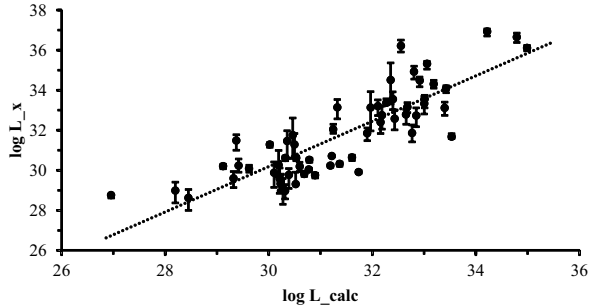


Рис. 8 — Сравнение наблюдательной и теоретической рентгеновской светимости

Рисунок и зависимость из работы диссертанта [16]

Прямая на рисунке 8 соответствует зависимостям:

$$L_x = 1.66 \times 10^{-4} L_{calc}^{1.14} \quad (14)$$

или

$$\log L_x = (1.13 \pm 0.09) \log L_{calc} - 3.78 \pm 2.93, \quad (15)$$

при коэффициенте корреляции $K = 0.84$ и вероятности случайного распределения $< 10^{-4}$. Учитывая, что в конкретных объектах γ_b и γ_p могут быть различными, соответствие L_{calc} и L_x следует признать очень хорошим, а использованную модель синхротронного излучения адекватно описывающей данные наблюдений.

Основными параметрами в уравнениях 11 - 13 являются лоренц-факторы релятивистских частиц. Как было показано Аронсом [30], функция распределения этих частиц может быть описана тремя частями: первичным пучком с лоренц-фактором γ_b , вторичной плазмой с максимумом при

γ_p и довольно длинным хвостом $\gamma_t = 10^4 - 10^5$. Обычно считается, что $\gamma_b = 10^6 - 10^7$. Здесь было использовано среднее значение $\gamma_b = 5 \times 10^6$. Что касается γ_p : эта величина сильно зависит от структуры магнитных полей в области каскадного рождения вторичных частиц. Если эта структура мультипольная, то γ_p порядка 10 [31]. Мультипольные магнитные поля были ранее предложены Рудерманом и Сазерлендом [32].

Как видно из уравнения 13, если одновременно увеличивать или уменьшать γ_b и γ_p в несколько раз, существенных изменений L_x не происходит. Однако если использовать значение $\gamma_p \geq 100$, то L_{calc} будет намного ниже по сравнению с наблюдаемыми значениями. В рамках модели это означает, что структура магнитных полей у поверхности нейтронной звезды, в области рождения вторичной плазмы, должна быть мультипольной.

В любом случае, как видно из уравнения 12, питч-угол увеличивается с увеличением расстояния, и условия для генерации синхротронного излучения становятся более благоприятными на больших расстояниях. В самом деле, Ψ пропорционально B^{-1} , т.е. возрастает как r^3 для дипольного поля. Для другой структуры магнитного поля эта зависимость может быть слабее, но в любом случае качественно будет наблюдаться рост Ψ с увеличением r .

Если предположить $\gamma_t = 10^4 - 10^5$ и $\gamma_b = 10^6 - 10^7$, то питч-угол

$$\Psi = \frac{377}{BP^{3/4}\gamma_r^{1/2}} \quad (16)$$

равен $5.41 \times 10^{-4} - 1.71 \times 10^{-2}$, принимая $B \sim 10^3$ Гс и среднее значение $P = 0.133$ с. Частота максимума в синхротронном спектре (см., например, [33])

$$\nu_{max} = 0.29 \frac{3 e B \sin \Psi}{2 m c} \gamma_r^2 \quad (17)$$

Эта частота соответствует энергии квантов:

$$\varepsilon = \hbar \nu_{max} \approx 5 \times 10^{-9} B \Psi \gamma_r^2 (eV) = 1.9 \times 10^{-6} \frac{\gamma_r^{3/2}}{P^{3/4}} (eV). \quad (18)$$

Здесь используется уравнение 16 и приближение $\sin \Psi \approx \Psi$. Для частиц с $\gamma_r = 10^4 - 10^7$ энергия $\varepsilon = 8.60 - 2.73 \times 10^5$ эВ, следовательно, можно описать весь рентгеновский диапазон.

Ещё одним аргументом в поддержку вывода о том, что рентгеновское нетепловое излучение генерируется на периферии магнитосферы пульсара за счёт синхротронного механизма, может служить заметная корреляция между рентгеновской светимостью и величиной магнитного поля на световом цилиндре (рис. 9), которая может быть представлена в виде:

$$\log L_x = (1.11 \pm 0.22) \log B_{lc} + 27.09 \pm 0.97. \quad (19)$$

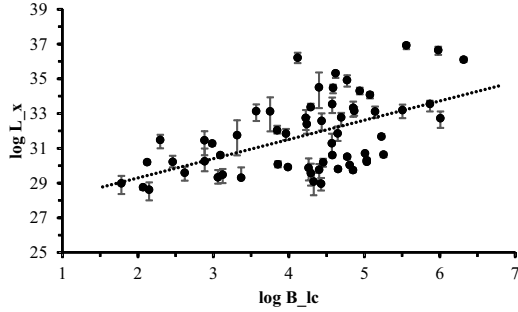


Рис. 9 — Зависимость светимости рентгеновского излучения от магнитного поля на световом цилиндре

Рисунок и зависимость были получены диссертантом в работе [16]

Коэффициент корреляции $K = 0.54$ с вероятностью случайного распределения меньше 10^{-6} .

В заключении приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Заметную бимодальность в распределениях периода, производной периода и магнитного поля на поверхности демонстрируют гамма-пульсары, громкие в радио-диапазоне, в этих же распределениях группа радио-тихих гамма-пульсаров хорошо описывается одной гауссианой. В группе γ нет объектов с миллисекундными периодами, малыми значениями производных периода и слабыми магнитными полями на поверхности нейтронной звезды. Периоды радио-громких гамма-пульсаров, в среднем, в несколько раз короче по сравнению с периодами в других группах. Распределения скорости потери энергии вращения для R-, X + R, γ - групп пульсаров хорошо описываются гауссианами, γ +R пульсары показывают почти равномерное распределение.
2. Величина $\frac{dE}{dt}$ у пульсаров с высокоэнергичным излучением на три порядка выше, чем у обычных радиопульсаров. Магнитное поле на световом цилиндре у пульсаров с высокоэнергичным излучением на два порядка выше, чем у обычных радиопульсаров. Это может свидетельствовать о генерации нетеплового жесткого излучения на периферии магнитосферы.
3. Выявлены две популяции гамма-пульсаров, разнесенных в пространстве на расстояния в несколько килопарсек.
4. Предположение о генерации гамма-излучения на периферии магнитосферы пульсаров с большими значениями магнитных полей

на световом цилиндре, подтверждается заметной корреляцией их гамма-светимости с величиной V_{lc} .

5. Корреляция между светимостями в гамма- и в радио диапазонах позволяет дать предложение по поиску гамма-излучения от некоторых из известных радиопульсаров и радиоизлучения от радио-тихих гамма-пульсаров.
6. Определены кандидаты из группы гамма-тихих радиопульсаров с большими значениями $\frac{dE}{dt}$ и V_{lc} , от которых можно ожидать заметного гамма-излучения. Также определены радио-тихие гамма-пульсаров, от которых можно ожидать заметного радиоизлучения, детектируемого на 111 МГц.
7. Рентгеновское нетепловое излучение генерируется на периферии магнитосферы пульсара за счёт синхротронного механизма. Это подтверждает сильная корреляция между наблюдаемыми значениями рентгеновской светимости и вычисленной на основе модели синхротронного механизма. Обнаруженная зависимость рентгеновской светимости от индукции магнитного поля на световом цилиндре служит дополнительным аргументом в пользу гипотезы о том, что генерация нетеплового рентгеновского излучения происходит, на периферии магнитосферы и вызвана синхротронным механизмом.

В Приложениях приведены выборки гамма-громких радиопульсаров, радио-тихих гамма-пульсаров, радиопульсаров, излучающих в рентгеновском диапазоне, определены радиопульсары, от которых можно ожидать заметного гамма-излучения, и гамма-пульсары, как источники радиоизлучения.

Литература

1. Hewish A., Bell S.J., Pilkington J.D.H. et al. Observation of a rapidly pulsating radio source // *Nature*. — 1968. — Vol. 217. — Pp. 709–713.
2. Малов И. Ф. Два типа пульсаров // *Труды ФИАН*. — 1989. — Т. 199. — С. 83–107.
3. Arons J. Pulsars as gamma ray sources // *Astronomy and Astrophysics Supplement*. — 1996. — Vol. 120, no. 1. — Pp. 49–60.
4. Малов И. Ф. Радиопульсары. — М.: Изд-во "Наука", 2004. — 194 с.
5. Sokolova E.V., Rubtsov G.I. Search for differences between radio-loud and radio-quiet gamma-ray pulsar populations with Fermi-LAT data // *Astrophysical Journal*. — 2016. — Vol. 83, no. 2. — Pp. 1–6.
6. Kaspi V.M., Kramer M. Radio pulsars: the neutron star population & fundamental physics // *Proceedings of the 26th Solvay Conference on Physics on Astrophysics and Cosmology*. — 2014.
7. Логинов А.А., Малов И.Ф. Различие параметров радиопульсаров с короткими и длинными параметрами // *Астрономический журнал*. — 2014. — Т. 91, № 10. — С. 833–845.
8. Abdo A.A., Ajello M., Allafort A. et al. The second Fermi Large Area Telescope catalog of gamma-ray pulsars // *The Astrophysical Journal Supplement*. — 2013. — Vol. 208, no. 2. — Pp. 1–59.
9. Manchester R.N., Hobbs G.B., Teoh A. et al. The ATNF pulsar catalogue // *Astronomical Journal*. — 2005. — Vol. 129, no. 4. — Pp. 1993–2006.
10. Possenti A., Cerutti R., Colpi M. et al. Re-examining the X-ray versus spin-down luminosity correlation of rotation powered pulsars // *Astronomy and Astrophysics*. — 2002. — Vol. 387. — Pp. 993–1002.
11. Prinz T., Becker W. A search for X-ray counterparts of radio pulsars // *arXiv:1511.07713*. — 2015.
12. Малов И. Ф., Тимиркеева М. А. Сравнение параметров радиотихих и радиогромких пульсаров // *Астрономический журнал*. — 2015. — Т. 92, № 9. — С. 742–750.
13. Malov I. F., Timirkееva M. A. Peculiarities in the emission of radio-loud and radio-quiet gamma pulsars and gamma-quiet radio pulsars // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America / Special Astrophysical Observatory*. — Vol. 510. — Nizhny Arkhyz, Russia: Astronomical Society of the Pacific, 2017. — Pp. 498–499.

14. *Malov I.F., Timirkeeva M.A.* Radio pulsars with expected gamma radiation and gamma-ray pulsars as pulsating radio emitters // *Research in Astronomy and Astrophysics*. — 2018. — Vol. 18, no. 8. — Pp. 89–189–8.
15. *Малов И. Ф., Тимиркеева М. А.* Особенности радиопульсаров с излучением вне радиодиапазона // *Астрономический журнал*. — 2014. — Т. 91, № 9. — С. 705–712.
16. *Malov I.F., Timirkeeva M.A.* On X-ray emission of radio pulsars // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2019. — Vol. 485, no. 4. — Pp. 5319–5328.
17. *Timirkeeva M. A., Malov I. F., Malofeev V. M. et al.* Radio loud and radio quiet pulsars with hard emission // *Astrophysics and Space Science*. — 2020. — Vol. 365. — Pp. 190–190–6.
18. *Малов И.Ф., Малов О.И.* Интегральные радиосветимости пульсаров // *Астрономический журнал*. — 2006. — Т. 83, № 6. — С. 542–555.
19. *Малов И. Ф., Мачабели Г. З.* Спектры жесткого излучения от радиопульсаров // *Астрономический журнал*. — 2002. — Т. 79, № 8. — С. 755–761.
20. *Шшиов В. И., Чашей И.В., Орешко В. В. и др.* Мониторинг турбулентного солнечного ветра на модернизированном радиотелескопе БСА ФИАН: первые результаты // *Астрономический журнал*. — 2016. — Т. 93, № 12. — С. 1045–1060.
21. *Abdo A. A., Ackermann M., Ajello M. et al.* Fermi Large Area Telescope observation of PSR J1836+5925 // *Astrophysical Journal*. — 2010. — Vol. 712. — Pp. 1209–1218.
22. *Halpern J. P., Gotthelf E. V., Mirabal N. et al.* The next Geminga: deep wavelength observation of a neutron stars identified with 3EG J1835+5918 // *Astrophysical Journal*. — 2002. — Vol. 573. — Pp. L41–L44.
23. *Halpern J. P., Camilo F., Gotthelf E. V.* The next Geminga: search for radio and X-ray pulsation from neutron stars identified with 3EG J1835+5918 // *Astrophysical Journal*. — 2007. — Vol. 668. — Pp. 1154–1157.
24. *Timirkeeva M., Malov I., Malov O.* Observations of the Gamma-Ray Pulsar J1836+5925 at 111 MHz // *Proceedings of the All-Russian Conference, 2020 / SAO RAS*. — Nizhny Arkhyz, Russia: 2020. — Pp. 451–454.
25. *Малов И.Ф.* О механизме рентгеновского излучения радиопульсаров // *Письма в Астрономический журнал*. — 2003. — Т. 29, № 8. — С. 571–579.

26. *Deutsch Arnim J.* The electromagnetic field of an idealized star in rigid rotation in vacuo // *Annales d'Astrophysique*. — 1955. — Vol. 18. — Pp. 1–10.
27. *Endean V. G., Allen J. E.* Contribution to the co-rotating magnetic field model of the pulsar // *Nature*. — 1970. — Vol. 228, no. 5269. — Pp. 348–350.
28. *Shitov Yu. P.* Period dependence of the spectrum and the phenomenon of twisting of the magnetic fields of pulsars // *Soviet Astronomy*. — 1983. — Vol. 27, no. 3. — Pp. 314–321.
29. *Shitov Yu. P.* Pulsar radio polarization and the magnetic field twist effect // *Soviet Astronomy*. — 1985. — Vol. 29, no. 1. — Pp. 33–39.
30. *Arons J.* Pulsar theory: particle acceleration and photon emission in the polar flux tube // Proc. Int. Summer School and Workshop on Plasma Astrophysics / European Space Agency. — Paris, France: 1981. — Pp. 273–289.
31. *Machabeli G.Z., Usov V.V.* Cyclotron instability and the generation of radio emission in pulsar magnetospheres // *Soviet Astronomy Letters*. — 1989. — Vol. 15, no. 5. — Pp. 393–397.
32. *Ruderman M.A., Sutherland P.G.* Theory of pulsars - polar caps, sparks, and coherent microwave radiation // *Astrophysical Journal*. — 1975. — Vol. 196. — Pp. 51–72.
33. *Pacholczyk A. G.* Radio astrophysics: non-thermal processes in galactic and extragalactic sources. — San Francisco: W. H. Freeman, 1970. — 269 pp.

Тимиркеева Мария Андреевна

Исследование особенностей радиопульсаров, излучающих в гамма- и
рентгеновском диапазонах

Автореф. дис. на соискание ученой степени

Подписано в печать _____._____._____. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография _____