

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
НАУКИ СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи *УДК 524.7-77*

Муфтахаров Тимур Васильевич

**НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ШИРОКОДИАПАЗОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ БЛАЗАРОВ**

01.03.02 — астрофизика и звездная астрономия

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Нижний Архыз — 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник  
**Мингалиев Марат Габдуллович**

Официальные оппоненты: кандидат физико-математических наук,  
**Горшков Александр Георгиевич**  
Государственный астрономический институт им.  
П. К. Штернберга МГУ им. М. В. Ломоносова,  
г. Москва, зав. лабораторией РАТАН-600.

доктор физико-математических наук,  
**Ларионов Валерий Михайлович**  
Санкт-Петербургский государственный университет,  
г. Санкт-Петербург, вед. науч. сотрудник,  
зав. лабораторией наблюдательной астрофизики.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория Российской академии наук,  
г. Санкт-Петербург.

Защита состоится 16 октября 2015 г. в 13:30 на заседании диссертационного совета Д 002.203.01 при Специальной астрофизической обсерватории РАН по адресу: 369167, Карачаево-Черкесская республика, Зеленчукский р-н, пос. Нижний Архыз.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке САО РАН.

Автореферат разослан " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2015 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 002.203.01, к.ф.-м.н.

Шолухова О. Н.

## Общая характеристика работы

### Актуальность задачи

На сегодняшний день изучение активных галактических ядер (АЯГ) является одной из интереснейших и многообещающих областей в астрофизике. С момента своего открытия этот класс объектов привлекает к себе внимание. Плазма, движущаяся с околосветовыми скоростями в джете, ультракомпактность центральной области, демонстрирующей экстремальную яркость, и многие другие необыкновенные свойства обеспечивают неугасающий интерес к АЯГ. За последние годы было запущено много выдающихся телескопов, одной из главных задач которых является изучения феномена АЯГ: космический телескоп Fermi-LAT, изучающий АЯГ в гамма-диапазоне, AGILE (итальянская орбитальная обсерватория для наблюдения в рентгеновском и гамма-диапазоне), NuSTAR (жесткий рентгеновский диапазон), WISE (космический телескоп, проводящий наблюдения в ИК-диапазоне), РадиоАстрон (космический радиотелескоп наземно-космического интерферометра) и др. Все эти миссии призваны помочь ученым приблизиться к пониманию уникальных процессов, происходящих в АЯГ. Наиболее обсуждаемыми и важными вопросами в этой области являются: структура магнитного поля вблизи центральной машины и в джете, механизм формирования гамма-излучения, его связь с длинноволновым излучением, происхождение джета, причина его необычайно сильной коллимации и др. Существуют много типов АЯГ, разделяемых по наблюдательным проявлениям активности. Наиболее мощные источники излучения во всех диапазонах, к тому же сильно и быстро переменные, из них — это блазары. Экстремальные проявления активности блазаров объясняются джетом, ориентированным под небольшим углом к наблюдателю, излучение которого носит нетепловой характер и объясняется синхротронным механизмом излучения релятивистских частиц. Блазары — одни из самых ярких источников на небе в гамма- и радиодиапазоне.

Наземными радиотелескопами решаются важные задачи по исследованию структуры центральных областей АЯГ (РСДБ метод), переменности излучения на различных длинах волн (от мм до дм), эволюции радиоспектров и др. Исследования проводятся как одиночными антеннами, так и в интерферометрических сетях (ALMA, EVN, VLBA и др.), а также в рамках международных многоволновых программ (WEBT, GASP). Наблюдательные данные радиотелескопа РАТАН-600, широко использованные в данной работе, являются надежной наблюдательной основой для проверки и дальнейшего развития существующих теоретических моделей. Основным преимуществом использования наблюдательного материала РАТАН-600 является многочастотность

и практически одновременность получаемых радиоданных. Особенностью этого телескопа также является возможность проводить постоянный мониторинг большого числа блазаров. Анализ мгновенных радиоспектров совместно с привлечением наблюдательных данных из других диапазонов позволяет узнать характер процессов, происходящих в блазарах и уточнить параметры, связанные с их строением.

### **Цели и задачи исследования**

Целью данной работы является комплексное исследование наблюдательных характеристик блазаров и связи их излучения в различных диапазонах электромагнитного спектра. Для достижения поставленной цели был сформулирован ряд задач:

- Проведение многочастотных долговременных наблюдений большого списка блазаров (несколько сотен) на радиотелескопе РАТАН-600; наблюдения проводились на частотах 2.3, 4.8, 7.7, 11.2 и 21.7 ГГц в период 2010–2014 гг. Обработка наблюдательного материала и получение мгновенных радиоспектров исследуемых объектов для ряда наблюдательных эпох.
- Изучение взаимосвязи излучения в джете и аккреционном диске блазаров; корреляции излучения в радио/гамма диапазонах с привлечением литературных данных и измерений РАТАН-600.
- Исследование параметров синхротронной компоненты спектрального распределения энергии для блазаров из списка РАТАН-600 по литературным данным; использование собственных почти одновременных наблюдательных данных в радио- и оптическом диапазоне ряда блазаров для решения этой задачи.

### **Научная новизна и достоверность результатов**

Многочастотные измерения большого списка блазаров (несколько сотен) на радиотелескопе РАТАН-600, проведенные в период 2010–2014 гг., являются новыми для исследуемой выборки и представлены в каталоге VLcat. Многополосная фотометрия в оптическом диапазоне и измерения звездных величин проведены автором, полученные результаты являются новыми для исследованных блазаров.

Интерактивный каталог измерений объектов типа VL Lacertae на РАТАН-600 является новым и первым в своем роде каталогом одновременных радиоизмерений на четырех–шести частотах (содержит более 300 объектов).

Результаты анализа корреляции потоков в радио- и гамма-диапазонах, выполненного с использованием квазисовременных измерений телескопов РАТАН-600 и Fermi-LAT, получены впервые для пяти радиочастот.

Параметры синхротронной компоненты в спектральном распределении энергии впервые оценены для почти 900 блазаров из списка мониторинга на РАТАН-600.

Измерения и обработка в радиодиапазоне производились на одном инструменте (РАТАН-600) с использованием штатных программных средств и общепринятых методов (апробированных многими исследователями), что исключает возможные систематические ошибки, возникающие при сравнении данных с разных телескопов, тем более полученных в разные эпохи. Наблюдения и обработка в оптическом диапазоне (Цейсс-1000) также проводились апробированными ранее методами, с использованием стандартных общепринятых программных средств.

### **Научная и практическая значимость**

Научная ценность состоит в получении новых радиоспектров объектов. Результаты анализа спектральных свойств источников могут быть использованы в дальнейших экспериментальных и теоретических исследованиях природы объектов и механизмов их излучения.

Результаты анализа связи излучения блазаров в разных диапазонах электромагнитного спектра могут использоваться в любых других исследованиях по этому направлению.

Интерактивный каталог измерений объектов типа VL Lacertae является полезным инструментом в изучении эволюции синхротронных радиоспектров, кривых блеска и переменности этого типа блазаров.

Частота максимума синхротронной компоненты спектрального распределения энергии, оцененная для большого числа (почти 900) блазаров, является важным параметром характеризующим излучение блазаров и полученные результаты могут быть полезными для астрофизиков, изучающих этот редкий подкласс АЯГ.

Результаты, приведенные в данной диссертации и опубликованные в научных статьях, могут быть использованы другими исследователями АЯГ и блазаров.

### **Основные результаты, выносимые на защиту**

1. Результаты многочастотных наблюдений на РАТАН-600 — измерения плотности потока на частотах 2.3, 4.8, 7.7, 11.2 и 21.7 ГГц; анализ радиоспектров нескольких сотен блазаров.
2. Результаты анализа взаимосвязи излучений в джете и аккреционном диске блазаров, проведенного с использованием данных РАТАН-600 и доступных литературных данных. Показано, что состояние лацертид в радиодиапазоне (активное или спокойное) влияет на величину коэффициента корреляции потока в радиодиапазоне и потока от области образования широких линий.

3. Анализ корреляции излучения в радио- и гамма-диапазонах, при использовании квазиодновременных наблюдательных данных телескопов РАТАН-600 и Fermi-LAT, выявил значимую корреляцию для обоих подклассов блазаров — лацертид и квазаров с плоским спектром, для всех пяти рассмотренных радиочастот (2.3–21.7 ГГц) и двух гамма полос (0.1–1 ГэВ). Полученный результат говорит в пользу тесной взаимосвязи гамма- и радиоизлучения и образования их из одной популяции фотонов.
4. Результаты оценки значения частоты максимума синхротронной компоненты ( $\nu_{peak}^s$ ) спектрального распределения энергии (SED) для выборки 875 блазаров из наблюдательного списка РАТАН-600 по неодновременным литературным данным. На основе этого проведена классификация блазаров выборки по типу SED и найдено различие в распределении этого параметра для двух подклассов блазаров — лацертид и квазаров с плоским спектром.
5. Результаты квазиодновременных наблюдений в оптическом и радиодиапазоне для шести объектов — блазаров с очень низкочастотным максимумом синхротронного излучения (VLSP). Определено значение  $\nu_{peak}^s$  для них и подтверждена классификация как VLSP трех из них.

### **Апробация работы**

Основные результаты диссертации докладывались на следующих российских и международных конференциях и семинарах:

1. XLII Young European Radio Astronomers Conference, ПРАО, Пушино, Россия, 18–21 сентября 2012 г.
2. The XII Finnish-Russian Radio Astronomy Symposium, Биологическая станция в Ламми, Финляндия, 15–18 октября 2012 г.
3. XXX конференция «Актуальные проблемы внегалактической астрономии», ПРАО, Пушино, Россия, 8–11 апреля 2013 г.
4. Всероссийская астрономическая конференция «Многоликая Вселенная» (ВАК-2013), Санкт-Петербург, Россия, 23–27 сентября 2013 г.
5. XLIV Young European Radio Astronomers Conference, Университет им. Н. Коперника, Торунь, Польша, 8–12 сентября 2014 г.
6. Конференция-семинар «Физика – космосу», МКШ им. В.Н. Челомея, Байконур, Россия, 25–30 октября 2014 г.
7. Конкурс-конференция работ сотрудников САО РАН, Нижний Архыз, Россия, 6 февраля 2015 г.
8. Астрофизический семинар на РАТАН-600, САО РАН, Россия, 30 апреля 2015 г.

9. The XIII Finnish-Russian Radio Astronomy Symposium, ГАО РАН, Санкт-Петербург, Россия, 25–29 мая 2015 г.

### **Публикации**

Материалы диссертации опубликованы в двенадцати печатных работах, из них шесть — в рецензируемых журналах (рекомендованных ВАК и индексируемых WoS), шесть — в сборниках тезисов докладов. Основные результаты изложены в следующих статьях:

1. M. Mingaliev, Yu. Sotnikova, T. Mufakharov, A. Erkenov, R. Udovitskiy. “Gigahertz-Peaked spectrum sources. Galaxy and Quasars” *Astrophysical Bulletin*, Volume 68, Issue 3, pp.257-267, 2013
2. T. Mufakharov, Yu. Sotnikova, A. Erkenov, M. Mingaliev. “Study of the Relation between the Jet and Accretion-Disk Emission in Blazars Using RATAN-600 Multifrequency Data” *Astrophysical Bulletin*, Volume 69, Issue 3, pp.247-259, 2014
3. M. Mingaliev, Yu. Sotnikova, R. Udovitskiy, T. Mufakharov, E. Nieppola, A. Erkenov. “RATAN-600 multi-frequency data for the BL Lac objects” *Astronomy and Astrophysics*, Volume 572, p. 59, 2014
4. T. Mufakharov, M. Mingaliev, Yu. Sotnikova, Ya. Naiden, A. Erkenov. “The observed radio/gamma-ray emission correlation for blazars with the Fermi-LAT and the RATAN-600 data” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 450, Issue 3, p.2658-2669, 2015
5. T. Mufakharov, Yu. Sotnikova, M. Mingaliev, A. Erkenov. “Multifrequency quasi-simultaneous observations of six low frequency peaked blazars” *Astrophysical Bulletin*, Volume 70, Issue 3, pp.273-279, 2015
6. M. Mingaliev, Yu. Sotnikova, T. Mufakharov, A. Erkenov, R. Udovitskiy. “A Study of the Synchrotron Component in the Blazar Spectral Energy Distributions” *Astrophysical Bulletin*, Volume 70, Issue 3, pp.264-272, 2015

### **Личный вклад автора**

Все работы, перечисленные в списке публикации по теме диссертации, выполнены в соавторстве. Вклад диссертанта в работы с первым авторством (2, 4, 5 из списка публикаций) является определяющим. Кроме этого, личный вклад в каждую из публикации заключается в следующем.

В статье 1: равный вклад в получение зависимостей, расчет параметров, построение графиков, написание соответствующих разделов статьи, обсуждение результатов; равный вклад при подготовке и публикации каталога в базе данных Vizier.

В статье 2: автору принадлежит постановка задачи, проведение расчетов, вклад

в обсуждение результатов и публикацию статьи.

В статье 3: работа с данными из литературы, представленными в каталоге, подготовка необходимого описательного материала для статьи, активное участие в написании текста, равный вклад в обсуждение результатов и публикацию статьи.

В статье 4: автору принадлежит постановка задачи, большая часть вычислений, основной вклад в обсуждение результатов и публикацию статьи.

В статье 5: автору принадлежит постановка задачи, получение наблюдательных данных, все расчеты, основной вклад в обсуждение результатов и публикацию статьи.

В статье 6: автором частично получены исследуемые параметры для большой выборки объектов по литературным данным, вклад соавторов в получение зависимостей, обсуждение результатов и публикацию статьи одинаков.

## Содержание и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитируемой литературы (162 наименования) и двух приложений. Объем работы — 127 страниц печатного текста, включая 27 рисунков.

Во **Введении** дается общая характеристика работы, обосновывается актуальность исследования, приводятся цели и задачи, научная новизна и научная и практическая ценность; приводятся результаты, выносимые на защиту, дается список конференций и работ, где были представлены результаты диссертации, описывается степень личного вклада автора.

В **Главе 1 “Активные галактические ядра”** дается определение активных галактических ядер (АЯГ) и приводится история их открытия (п. 1.1), далее формулируется современное представление об АЯГ в рамках унифицированной модели (п. 1.2), объясняющей разнообразие наблюдательных проявлений АЯГ ориентацией их компонент по отношению к наблюдателю [1] и рассматриваются основные компоненты АЯГ: массивный центральный объект, аккреционный диск, джет, области образования спектральных линий (BLR, NLR) и виды их излучений. В пункте 1.3 уделяется особое внимание основному подклассу АЯГ, изучаемому в данной работе — блазарам; приводятся их характеристики, описываются наиболее значимые обзоры и объясняется классификация блазаров по положению максимума синхротронной компоненты ( $\nu_{peak}^s$ ) их спектрального распределения энергии (SED) — разделение на подклассы по такому критерию широко использовано в данной диссертации. Источники с  $\nu_{peak}^s < 10^{14.5}$  Гц называют блазарами с низкочастотным максимумом синхротронного излучения

(low synchrotron-peaked, LSP), при  $10^{14.5} < \nu_{peak}^s < 10^{16.5}$  Гц и  $\nu_{peak}^s > 10^{16.5}$  Гц, соответственно, называют блазарами с промежуточным значением максимума синхротронного излучения (intermediate synchrotron-peaked, ISP) и с высокочастотным максимумом синхротронного излучения (high synchrotron-peaked, HSP) [1, 2]. Исторически принято относить к блазарам квазары с плоским спектром (flat-spectrum radio quasars, FSRQ) и лацертиды (BL Lacertae type objects, BL Lac).

**Глава 2 “Многолетнее и многочастотное исследование блазаров на РАТАН-600”** посвящена описанию многолетнего мониторинга большой выборки блазаров на РАТАН-600. Результаты этих многочастотных наблюдений широко использованы в данной диссертации.

В **пункте 2.1** дано описание радиотелекопа РАТАН-600 и его особенностей [3–5]. РАТАН-600 — крупнейший радиотелескоп рефлекторного типа, состоящий из 895 элементов, расположенных в виде кольца. Внутри этой конструкции расположено еще одно плоское зеркало (перископ), состоящее из 124 элементов.

Методика наблюдений изложена в пункте 2.1.1: при исследовании большого числа объектов (например, мониторинг большого списка АЯГ) используется режим прохождения источника через неподвижную диаграмму направленности сектора РАТАН-600 [6]. Все наблюдения, использованные в данной работе, проводились в режиме прохождения источника с использованием Северного, Южного и Южного с перископом секторов РАТАН-600.

Описание приемного комплекса и системы сбора данных и управления [7] приведено в пункте 2.1.2, основной комплект радиометров континуума установлен в приемной кабине №1 (21.7, 11.2, 4.8, 2.3 и 1.1 ГГц). Начиная с 2012 года проводятся систематические наблюдения объектов АЯГ с использованием неохлаждаемого приемного комплекса радиометров «ЭРИДАН» сантиметрового диапазона в приемной кабине №2 (21.7, 11.2 и 4.8 ГГц). Методика обработки и калибровки измерений кратко описана в пункте 2.1.3, калибровочные источники с принятыми значениями плотностей потоков на частотах РАТАН-600 приведены в Таблице 2.2.

В пункте 2.1.4 представлена информационно-аналитическая система оценки параметров радиоисточников в континууме на РАТАН-600 [8, 9] и примеры обработки источников с этой системой.

В **пункте 2.2** повествуется об актуальности подобных мониторингов и исследовании блазаров на РАТАН-600. Наиболее полным каталогом известных блазаров на данный момент является Roma-BZCAT<sup>1</sup> [10]. Последняя версия этого каталога (Версия 5.0.0) содержит 1425 блазаров типа BL Lac (лацертид), а всего блазаров более 3500. Тем не менее, лишь для небольшого числа блазаров представ-

<sup>1</sup><http://www.asdc.asi.it/bzcat/>

ляется возможным найти многоволновые наблюдательные данные из различных диапазонов. А наблюдения, проведенные одновременно (или квазисовременно), доступны для еще меньшего числа объектов. Важность наличия таких данных сложно переоценить, так как классификация подклассов блазаров, определение важнейших физических параметров, исследование физических процессов, происходящих в этих уникальных объектах, относящихся к АЯГ, — все это основано на наблюдательных данных и их достоверности. Также важным является долговременный мониторинг блазаров, в силу их переменной природы.

Описание выборки и наблюдений дано в пункте 2.3 (полный список источников приведен в Приложении А). Выборка блазаров типа BL Lac содержит 300 объектов, выбранных из каталога Массаро Roma-BZCAT. Первые наблюдения объектов из этой выборки начались в 2006 году (тогда выборка составляла 108 блазаров). Систематический мониторинг этой первичной выборки проводился в 2006–2008 годах. В 2009–2011 годах наблюдательные данные неоднородны, так как лишь небольшая часть источников из выборки наблюдалась в этот период времени. С 2012 года в выборку вошли все блазары из каталога Roma-BZCAT, доступные для наблюдений на РАТАН-600, с плотностью потока больше 400 мЯн, а с 2014 года добавились источники с плотностью потока больше 100 мЯн (на частоте 1.4 ГГц).

В пункте 2.4 дано определение индекса переменности и спектрального индекса — основных характеристик исследуемых объектов в радиодиапазоне, представленных в каталоге VLcat<sup>2</sup> [11]. Описание интерактивного онлайн каталога VLcat, представляющего в удобной форме радиоизмерения большой выборки блазаров на РАТАН-600, приведено в пункте 2.5. VLcat состоит из списка объектов с их основными параметрами и наблюдательными данными РАТАН-600. Все данные, представленные в каталоге, доступны для экспортирования в различных форматах. Одним из параметров, представленных в VLcat, является максимум синхротронной компоненты SED —  $\nu_{peak}^s$ .

В пункте 2.5.2 описаны проведенные измерения этого параметра по литературным данным, с помощью веб-сервиса ASDC SED Builder Tool<sup>3</sup>, и последующая классификация блазаров каталога по этому параметру на высоко/промежуточно/низко частотные (HSP/ISP/LSP типы). В текущей версии каталога VLcat доминируют представители блазаров с низкочастотным максимумом синхротронного излучения (140 объектов с  $\nu_{peak}^s < 10^{14.5}$  Гц). VLcat может быть использован для статистического изучения радиосвойств блазаров, для исследования поведения различных подклассов этих объектов в радиодиапазоне. Отличительной особенностью представленных наблюдательных данных является

<sup>2</sup>опубликован на странице обсерватории CAO РАН <http://www.sao.ru/blcat/>

<sup>3</sup><http://tools.asdc.asi.it/SED>

использование одного инструмента для получения квазиодновременных многочастотных измерений. Список блазаров периодически дополняется и обновляется как архивными, так и новыми наблюдательными данными. Результаты этой Главы изложены в работе [11], выполненной в соавторстве с диссертантом.

**В Главе 3 “Изучение связи излучения в джете и аккреционном диске блазаров с использованием многочастотных данных РАТАН-600”** рассмотрена связь излучения в джете и аккреционном диске блазаров. В вводной части 3.1 приводится актуальность темы и обзор предыдущих работ. В современных теоретических моделях предполагается, что джет образуется вблизи центральной черной дыры, усиливаясь за счет её вращения, или происходит из аккреционного диска [12, 13]. В обоих случаях подразумевается существование связи между светимостью в джете и темпом аккреции вещества на черную дыру (ЧД). Эффективным методом исследования этой связи является изучение соотношения светимостей в различных диапазонах частот и светимости в области образования широких линий (BLR), которая находится вблизи центрального объекта и ионизируется его излучением (см., например, работы [13–17]).

Теоретические выкладки о связи излучений джета и BLR приведены в пункте 3.2. В пункте 3.3 приведено описание выборки и использованных наблюдательных данных: выборка состоит из 37 блазаров (25 — FSRQ, 10 — BL Lac типа и 2 блазара неопределенного типа), для которых известны потоки в широком диапазоне частот и доступны квазиодновременные радионаблюдения на РАТАН-600. Список исследуемых объектов основан на каталоге блазаров, представленном в работе [18]. Из этой работы взяты потоки в рентгеновском (1 кэВ) и в оптическом ( $5500 \text{ \AA}$ ) диапазонах. Наблюдения объектов проводились на радиотелескопе РАТАН-600 в период 2005–2014 гг. в рамках наблюдательных программ по многочастотному мониторингу ярких представителей АЯГ. Все представленные в данном исследовании измерения плотности потока блазаров, проведенные на РАТАН-600, опубликованы в ряде работ [19–23]. Значения плотностей потоков некоторых объектов типа BL Lacertae также доступны в онлайн-каталоге VLcat [11].

Далее в пункте 3.4 представлены результаты корреляционного анализа потоков из различных диапазонов. Для оценки влияния переменности излучения в радиодиапазоне мы использовали максимальные и минимальные значения плотностей потоков для блазаров выборки, полученных на РАТАН-600 (описано в п. 3.5).

В пункте 3.6 ведется обсуждение полученных результатов с учетом неоднородности данных и влияния переменности: показано, что сильная переменность всего нескольких источников оказывает значительное влияние на величину коэффициента корреляции в выборке, в частности, состояние лацертиды в радиодиапазоне (активное или спокойное) влияет на величину коэффициента корреляции

ляции потока в радиодиапазоне и потока от BLR. В активном состоянии корреляция не обнаруживается. Но в спокойном состоянии коэффициент корреляции у лацертид заметно возрастает (в среднем коэффициент корреляции Пирсона увеличился на 0.25, с  $\sim 0.4$  до  $\sim 0.7$ ), в то время как у FSRQ-блазаров коэффициент корреляции меняется мало ( $\sim 0.4$ – $0.5$ ). По имеющимся литературным данным также обнаружена корреляция в излучении блазаров в диапазоне от радио до рентгена.

В заключительном пункте 3.7 делается вывод о том, что для достоверного исследования взаимосвязи излучения в джете и аккреционном диске таких переменных объектов как блазары требуются одновременные измерения потоков в разных диапазонах, а также сравнительный анализ корреляции излучения, выполненный при в разных состояниях объектов. Результаты этой Главы опубликованы в работе [24].

В Главе 4 “**Корреляция излучения в гамма и радиодиапазоне для блазаров по данным телескопов Fermi-LAT и РАТАН-600**” приводятся результаты анализа корреляции излучения блазаров в гамма- и радиодиапазоне по квази-одновременным данным телескопов Fermi-LAT и РАТАН-600. В вводной части 4.1 этой Главы приводится актуальность темы и краткий обзор подобных исследований [25–28]. В SED блазаров имеются два характерных компонента: низкочастотный, с максимумом в оптической/УФ или рентгеновской области спектра и высокочастотный, с максимумом в гамма-диапазоне. Объясняются они синхротронным и обратным комптоновским механизмами излучения [29]. Фотоны, необходимые для формирования второго компонента SED, образуются в результате обратного комптоновского излучения «первичной популяции фотонов», которая может быть образована синхротронным излучением или которая может быть взята из внешнего источника. В первом случае процесс излучения носит название синхрокомптоновского (synchrotron self-Compton, SSC) [30, 31], а во втором случае — внешнего обратного комптоновского (external inverse Compton, EC) [32, 33]. Если фотоны гамма-диапазона происходят благодаря SSC, можно предположить коррелированность потоков в радио- и гамма-диапазонах из-за единого источника фотонов. Отсутствию какой-либо взаимосвязи излучений в этих диапазонах, напротив, послужит доводом в пользу EC сценария.

В пункте 4.2 этой Главы представлено описание выборки и использованных данных: первый каталог космического телескопа Ферми — Fermi-LAT first source catalog (1FGL) [34] и наблюдательные данные РАТАН-600 в радиодиапазоне (за тот же период, когда проводился обзор для первого каталога Ферми). В выборке из 123 блазаров представлены различные подклассы: 53 — BL Lac, 6 — BL Lac кандидаты, 8 — блазары неопределенного типа, 56 — FSRQ.

Результаты корреляционного анализа для потоков и светимостей приведены в

пункте 4.3. Для оценки зависимости  $F_\gamma - F_r$  считались коэффициенты корреляции Пирсона ( $r$ ). Коэффициент корреляции оказался чувствительным к рассматриваемой частоте и полосе гамма-излучения: он становится меньше при рассмотрении потоков в полосе высоких энергий, причем это справедливо для обоих типов блазаров. Обнаружена положительная корреляция плотности потока в радиодиапазоне с потоком в гамма-диапазоне для источников из исследуемой выборки, но существует значительный разброс в значениях коэффициента корреляции  $r$  (в диапазоне от -0.03 до 0.74). Для объектов BL Lac типа корреляция выше, чем для FSRQ типа блазаров, в полосах с низкими энергиями (2.3–4.8 ГГц и 0.1–1 ГэВ). Также, для BL Lac-блазаров корреляция радиоизлучения примерно одного порядка и на частоте 2.3, и на 21.7 ГГц с потоком в диапазоне 0.1–1 ГэВ, а у FSRQ-блазаров корреляция излучения на частоте 2.3 ГГц заметно ниже (чем на частоте 21.7 ГГц) с потоком в полосах 0.1–1 ГэВ. Для BL Lac-блазаров обнаруживается положительная корреляция с высоким уровнем значимости ( $> 99\%$ ) на всех рассмотренных частотах и полосах энергии меньше 3 ГэВ. В диапазоне высоких энергий (10–100 ГэВ) для BL Lac объектов корреляция потоков радио- и гамма-диапазонов практически не наблюдается. В работе [27] анализ поведения корреляции для BL Lac объектов выявил такой же результат: с увеличением энергии фотонов гамма-излучения, корреляция с радиоизлучением уменьшается и даже исчезает. Величина коэффициента корреляции, очевидно, зависит от рассматриваемой полосы гамма-излучения — корреляция радиоизлучения на любой из рассмотренных частот сильнее с потоком в полосах 0.1–1 ГэВ. В целом для блазаров типа BL Lac корреляция излучений сильно зависит от гамма-диапазона, а для блазаров типа FSRQ коэффициент корреляции значительно меняется и с рассматриваемой радиочастотой, и с гамма-диапазоном. Для оценки степени достоверности полученных коэффициентов корреляции мы использовали метод генерации суррогатных выборок [35] (описан в п. 4.3.3). В результате его применения мы обнаружили, что корреляция излучений во всех рассмотренных радио- и гамма-диапазонах (меньше 3 ГэВ) статистически значима для BL Lac-блазаров (вероятность случайного возникновения корреляции составила всего лишь  $\sim 10^{-3} - 10^{-7}$ ). Наиболее достоверны коэффициенты корреляции для полосы 0.1–0.3 ГэВ, а для полосы 10–100 ГэВ — наоборот: коэффициенты корреляции незначимы для обоих подклассов блазаров на всех рассмотренных частотах. Выводы о наличии взаимосвязи излучений радио- и гамма-диапазоне с учетом проведенного теста на значимость полученных коэффициентов корреляции сформулированы в пункте 4.4. В исследовании использовались почти одновременные наблюдательные данные в гамма- и радиодиапазоне, усредненные за один и тот же период времени. Наличие квазиодновременных наблюдательных данных в широком интервале радиочастот позволило оценить корреляцию для

пяти частот (от 2.3 до 21.7 ГГц), что было сделано *впервые*. Степень синхронности наблюдений в этих диапазонах играет важную роль и сильно влияет на результат анализа корреляции, это показано, например, в работах [27, 36]. Наряду с результатами предыдущих исследователей взаимосвязи излучения в гамма- и радиодиапазоне в АЯГ (например, [25–27]), результаты настоящей работы могут быть рассмотрены как допускающие наличие связи между излучениями в этих разных диапазонах электромагнитного спектра и как вывод в пользу теории о единой популяции фотонов гамма- и радиоизлучения блазаров (в рамках SSC модели излучения). Два вероятных механизма, ответственных за гамма-излучение в блазарах, SSC и ЕС, возможно оба присутствуют, но в различных случаях дают разный вклад. Поэтому так нетривиально сделать однозначный вывод о прямой и очевидной взаимосвязи излучения блазаров в этих диапазонах электромагнитного спектра. Результаты работы не противоречат выводам, сделанным предыдущими исследователями, а дополняют их результаты более подробным представлением радиодиапазона. Результаты этой Главы изложены в работе [37].

В Главе 5 “Исследование синхротронной компоненты в спектральном распределении энергии блазаров” описывается исследование синхротронной компоненты в спектральном распределении энергии различных типов и подклассов блазаров. Актуальность исследования приведена во вводящей части Главы. В первой части Главы 5 (п. 5.2) оценивается основной параметр спектрального распределения энергии — частота максимума синхротронного излучения ( $\nu_{peak}^s$ ) для 877 объектов выборки. Для этого используются неодновременные архивные данные каталога блазаров Roma-BZCAT и инструмент ASDC SED Builder Tool. Проведена классификация объектов выборки на основе этого параметра спектрального распределения энергии на блазары с низкой/промежуточной/высокой частотой синхротронной компоненты (low/intermediate/high synchrotron peaked — LSP/ISP/HSP): 611 — LSP, 222 — ISP, 42 — HSP. Блазаров с «очень высоким» значением  $\nu_{peak}^s > 10^{19}$  Гц не обнаружено. Блазары с «очень низким» значением  $\nu_{peak}^s < 10^{13}$  Гц чаще встречаются среди FSRQ (41%), чем среди BL Lac (всего 9%). Распределения величины  $\nu_{peak}^s$  для двух подгрупп блазаров (FSRQ и BL Lac) носят различный характер. Для BL Lac и кандидатов оно шире и смещено в более высокочастотную область — среднее значение  $10^{14.6 \pm 1.4}$  Гц. Для FSRQ-блазаров среднее значение равно  $10^{13.4 \pm 1.0}$  Гц. Статистические тесты на принадлежность выборок блазаров FSRQ и BL Lac одному закону распределения показали, что величины  $\nu_{peak}^s$  и спектральная плотность потока  $F_{4.8\text{ГГц}}$  образуют разные распределения. Для двух типов объектов BL Lac — обнаруженных в радио и рентгеновских обзорах (radio-selected BL Lac, RBL и X-ray-selected BL Lac, XBL) — распределения

величин  $\nu_{peak}^s$  и  $F_{4.8\text{ГГц}}$  также образуют разные распределения (по уровню значимости 0.05). Среднее значение  $\nu_{peak}^s$  для RBL составляет  $10^{13.9\pm 0.9}$  Гц, для XBL —  $10^{15.9\pm 1.3}$  Гц.

**Во второй части Главы 5** (п. 5.3) приводятся результаты собственных квазиодновременных наблюдений шести блазаров на телескопах Цейсс-1000 и РАТАН-600, проведенных в 2014 году. Исследовались кандидаты в объекты с очень низким значением максимума синхротронной компоненты (very low synchrotron peaked — VLSP, с  $\nu_{peak}^s < 10^{13}$  Гц). Выборка описана в пункте 5.3.1. В части 5.3.2 этого пункта приводится описание наблюдений и обработки данных в двух диапазонах. В результате, для трех источников (PKS 0446+11, [HB89] 1308+326 и 3C 345) подтвердилась их классификация как VLSP, для остальных трех блазаров расчеты показали  $\nu_{peak}^s > 10^{13}$  Гц (п. 5.4). Результаты этой Главы изложены в совместных работах диссертанта [38, 39].

**В Заключение** суммированы основные результаты работы.

**В Списке литературы** дан перечень публикаций, цитируемых и используемых в работе.

**В Приложении А** приведена таблица со списком блазаров и их параметрами, которая обсуждается в **Главе 2**.

**В Приложении Б** приведена таблица с измерениями плотностей потока на РАТАН-600 и рисунки (зависимости излучения в радио- и гамма-диапазонах), которые обсуждаются в **Главе 4**.

## Список сокращений

- АЯГ** — Активные ядра галактик или активные галактические ядра;
- Джет** — Узконаправленный пучок частиц с высокой энергией (от англ. jet — струя);
- BLR** — (Broad line region) Область широких спектральных линий;
- BL Lac** — (BL Lacertae type object) Объект типа BL Ящерицы;
- FSRQ** — (Flat spectrum radio quasars) Квазар с плоским радиоспектром;
- HSP** — (High synchrotron-peaked) Блазары с высокочастотным максимумом синхротронного излучения;
- ISP** — (Intermediate synchrotron-peaked) Блазары с максимумом синхротронного излучения на промежуточных частотах;
- LSP** — (Low synchrotron-peaked) Блазары с низкочастотным максимумом синхротронного излучения;
- OBL** — (Optically-selected BL Lac) BL Lac, отождествленный в оптическом обзоре;
- RBL** — (Radio-selected BL Lac) BL Lac, обнаруженный в радиообзоре;
- SSC** — (Synchrotron self Compton) Синхрокомптоновский механизм излучения;
- SED** — (Spectral energy distribution) Спектральное распределение энергии;
- VLSP** — (Very low synchrotron-peaked) Блазары с очень низкочастотным максимумом синхротронного излучения;
- XBL** — (X-ray-selected BL Lac) BL Lac, обнаруженный в рентгеновском обзоре.

## Список литературы

1. C. M. Urry and P. Padovani, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **107**, 803 (1995).
2. P. Padovani and P. Giommi, *Astrophys. J.* **444**, 567 (1995).
3. S. E. Khaikin, N. L. Kaidanovskii, I. N. Pariiskii, and N. A. Esepkina, *Izvestiya Glavnoj Astronomicheskoi Observatorii v Pulkove* **188**, 3 (1972).
4. I. N. Pariiskii and O. N. Shivris, *Izvestiya Glavnoj Astronomicheskoi Observatorii v Pulkove* **188**, 13 (1972).
5. I. N. Pariiskii, O. N. Shivris, D. V. Korolkov, et al., *Radiofizika* **19**, 1581 (1976).
6. Y. N. Parijskij, *IEEE Antennas and Propagation Magazine* **35** (1993).
7. P. G. Tsybulev, *Astrophysical Bulletin* **66**, 109 (2011).
8. O. V. Verkhodanov, *Astronomical Data Analysis Software and Systems VI, A.S.P. Conference Series* **125**, 46 (1997).

9. R. Y. Udovitskiy, Proceedings of the Institute of Applied Astronomy of RAS **177**, 24 (2012).
10. E. Massaro, P. Giommi, C. Leto, et al., Astron. and Astrophys. **495**, 691 (2009).
11. M. G. Mingaliev, Y. V. Sotnikova, R. Y. Udovitskiy, et al., Astron. and Astrophys. **572**, A59 (2014).
12. R. D. Blandford and R. L. Znajek, Monthly Notices Royal Astron. Soc. **179**, 433 (1977).
13. L. Maraschi and F. Tavecchio, Astrophys. J. **593**, 667 (2003).
14. A. Celotti, P. Padovani, and G. Ghisellini, Monthly Notices Royal Astron. Soc. **286**, 415 (1997).
15. X. Cao and D. R. Jiang, Monthly Notices Royal Astron. Soc. **307**, 802 (1999).
16. C. Xu, M. Livio, and S. Baum, Astron. J. **118**, 1169 (1999).
17. G. Z. Xie, H. Dai, and S. B. Zhou, Astron. J. **134**, 1464 (2007).
18. D. Donato, G. Ghisellini, G. Tagliaferri, and G. Fossati, Astron. and Astrophys. **375**, 739 (2001).
19. Planck Collaboration, J. Aatrokoski, P. A. R. Ade, et al., Astron. and Astrophys. **536**, A15 (2011).
20. P. Giommi, G. Polenta, A. Lähteenmäki, et al., Astron. and Astrophys. **541**, A160 (2012).
21. M. G. Mingaliev, Y. V. Sotnikova, N. N. Bursov, et al., Astron. Zh. **51**, 343 (2007).
22. M. G. Mingaliev, Y. V. Sotnikova, N. S. Kardashev, and M. G. Larionov, Astronomy Reports **53**, 487 (2009).
23. M. G. Mingaliev, Y. V. Sotnikova, I. Tornainen, et al., Astron. and Astrophys. **544**, 1 (2012).
24. T. V. Mufakharov, Y. V. Sotnikova, A. K. Erkenov, and M. G. Mingaliev, Astrophysical Bulletin **69**, 266 (2014).
25. G. Ghirlanda, G. Ghisellini, F. Tavecchio, and L. Foschini, Monthly Notices Royal Astron. Soc. **407**, 791 (2010).
26. Y. Y. Kovalev, H. D. Aller, M. F. Aller, et al., Astrophys. J. **696**, L17 (2009).

27. M. Ackermann, M. Ajello, A. Allafort, et al., *Astrophys. J.* **741**, 30 (2011).
28. E. Nieppola, M. Tornikoski, E. Valtaoja, et al., *Astron. and Astrophys.* **535**, A69 (2011).
29. R. M. Sambruna, L. Maraschi, and C. M. Urry, *Astrophys. J.* **463**, 444 (1996).
30. A. Konigl, *Astrophys. J.* **243**, 700 (1981).
31. A. P. Marscher and W. K. Gear, *Astrophys. J.* **298**, 114 (1985).
32. M. Sikora, M. C. Begelman, and M. J. Rees, *Astrophys. J.* **421**, 153 (1994).
33. R. D. Blandford and A. Levinson, *Astrophys. J.* **441**, 79 (1995).
34. A. A. Abdo, M. Ackermann, M. Ajello, et al., *Astrophys. J.* **715**, 429 (2010).
35. V. Pavlidou, J. L. Richards, W. Max-Moerbeck, et al., *Astrophys. J.* **751**, 149 (2012).
36. J. León-Tavares, E. Valtaoja, P. Giommi, et al., *Astrophys. J.* **754**, 23 (2012).
37. T. Mufakharov, M. Mingaliev, Y. Sotnikova, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **450**, 2658 (2015).
38. T. V. Mufakharov, Y. V. Sotnikova, M. G. Mingaliev, and A. K. Erkenov, *Astrophysical Bulletin* **70**, 273 (2015).
39. M. G. Mingaliev, , Y. V. Sotnikova, et al., *Astrophysical Bulletin* **70**, 264 (2015).

Бесплатно

Муфухаров Тимур Василевич  
Наблюдательные характеристики широкодиапазонного излучения блазаров

Заказ №197с

Уч. изд. л. – 1.0

Тираж 100

---

САО РАН