

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ РОССИЙСКОЙ
АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

Соловьёв Дмитрий Игоревич

**ПРОТЯЖЕННЫЕ СТРУКТУРЫ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РЕЛИКТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
С НИМИ**

Специальность 01.03.02 – астрофизика и звёздная астрономия

Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата
физико-математических наук

САО РАН, 2021

Работа выполнена в Специальной Астрофизической Обсерватории Российской Академии Наук (САО РАН).

Научный руководитель **Верходанов Олег Васильевич**
доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты **Зинченко Игорь Иванович**
доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом радиоприемной аппаратуры и миллиметровой радиоастрономии Института прикладной физики РАН (ИПФ РАН, г. Нижний Новгород)

Пилипенко Сергей Владимирович
кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник отдела теоретической астрофизики Астрокосмического центра Физического института им. П.Н.Лебедева РАН (ФИАН, г. Москва)

Ведущая организация Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ, г. Санкт-Петербург)

Защита состоится «9» июня 2021 в 15 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д002.023.01 Физического института им. П. Н. Лебедева РАН по адресу: г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32, подъезд А2, Институт космических исследований РАН, зал семинаров – к. 707.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке Физического института имени П. Н. Лебедева РАН по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д.53, и на сайтах ФИАН <http://lebedev.ru> и <http://asc-lebedev.ru> в разделе "Диссертационный совет". Заверенные отзывы направлять по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53, ФИАН (АКЦ), диссертационный совет Д 002.023.01.

Автореферат разослан «9» апреля 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук

Ю. А. Ковалев

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Проведение в последние 15 лет новых высокочувствительных обзоров неба в радио и других диапазонах длин волн позволило исследовать различные популяции объектов с применением новых статистических методов, ориентированных на анализ данных на полной сфере. Среди таких обзоров всего неба можно отметить наблюдения космических обсерваторий WMAP НАСА [1] и Planck ЕКА [2, 3], предоставивших астрономическому сообществу данные на полной сфере в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах. Эти наблюдательные данные являются важным дополнением к имеющимся неполным обзорам неба, проведенным, в том числе, и на радиотелескопе РАТАН-600 на сантиметровых и дециметровых волнах.

Среди интересных популяций внегалактических радиоисточников, которые можно исследовать благодаря полноте новых обзоров и их сравнительно высокой чувствительности, следует особо отметить гигантские радиогалактики (ГРГ), чей линейный размер превышает 1 Мпк. Кроме того, у десятков наблюдаемых ГРГ угловой размер превышает 4 минуты дуги, что искажает угловой спектр мощности наблюдаемых неоднородностей, исследуемый на разных частотах. Гигантские радиогалактики являются одними из самых крупных объектов во Вселенной и могут оказывать заметное влияние на окружающее пространство [6], влияя также и на карту реликтового фона (далее СМВ - Cosmic Microwave Background) [7]. Количество подтвержденных ГРГ - порядка четырех сотен объектов, и их число постоянно растет. До сих пор остается невыясненной причина существования столь больших образований как ГРГ, сравнимых по порядку размера со скоплениями галактик. Довольно медленное накопление данных по различным свойствам ГРГ связано, в первую очередь, с их малочисленностью, и также с не очень высокой радиояркостью. Поэтому среди основных задач по изучению гигантских радиогалактик наиболее важными является поиск новых объектов со свойствами, подобными и близкими к ГРГ, статистический анализ имеющейся выборки объектов данной популяции и выделение их характерных особенностей в различных диапазонах спектра.

Для ускоренной селекции объектов, подобных ГРГ, с протяженным излучением, из имеющихся наиболее полных списков радиоисточников требуется разработать и применить алгоритмы, использующие фазовые свойства таких объектов (форма, размер и ори-

ентация) на картах неба. Это позволит отбирать объекты с определенными свойствами, исследовать их радиоспектры, а также в рамках процедуры стэкинга анализировать излучение от осреднённого объекта популяции на разных волнах.

Подходы, ориентированные на анализ спектральных свойств протяженных радиоисточников, могут помочь и при поиске кандидатов в скопления галактик на картах миллиметрового и субмиллиметрового диапазонах как на малых, так и на больших красных смещениях. Одним из интересных моментов является возможное предсказанное проявление эффекта Сюняева-Зельдовича (далее СЗ) [7] в протяженных компонентах ГРГ. Это может дать дополнительный вклад в угловой спектр мощности излучения от скоплений галактик и, кроме того, сыграть свою роль при оценке положения и амплитуды источников с СЗ-эффектом.

Разрабатываемое программное обеспечение и модели распределения протяженных радиоисточников на сфере играют ключевую роль и при подготовке и моделировании экспериментов следующего поколения по изучению мироволнового фона, связанным, в частности, с поляризационными характеристиками СМВ и проблемами разделения компонент сигнала. Для этого необходимо уметь генерировать модели протяженных радиоисточников с характерными фазовыми и спектральными свойствами, соответствующими наблюдательным данным.

Поиск новых ГРГ и исследование их физических параметров, а также анализ и моделирование их статистических популяционных свойств помогут при решении описанных проблем.

Цели и задачи работы

Главной целью работы является исследование гигантских радиогалактик в миллиметровом диапазоне длин волн.

В работе последовательно исследуются следующие вопросы: методы и результаты поиска ГРГ; способы их выделения на картах обзора Planck; оценка вклада их излучения на основе моделирования пространственного распределения.

Развитие темы исследования также вызвало следующие дополнительные задачи:

- Оценка спектральных плотностей потоков радиоизлучения ГРГ в данных Planck с использованием измерений источников RCR каталога на РАТАН-600 и кросс-отождествления с данными других обзоров;
- Измерение среднего потока по популяции ГРГ и демонстрация отличия этих объектов от других выборок радиогалактик на основе миллиметровых данных Planck;
- Новый метод поиска объектов с эффектом Сюняева-Зельдовича;
- Обнаружение радиогалактик с признаками слияния среди ГРГ.

Далее поясним, как развивалась тема исследования.

В первую очередь мы поставили цель максимально расширить список уже известных гигантских радиогалактик. Для решения этой задачи был разработан метод поиска кандидатов в объекты этой группы протяженных объектов, основанный на морфологии радиоисточников. Ввиду того, что большинство гигантских радиогалактик принадлежат к морфологическому типу FR II [8], мы искали на небе сонаправленные протяженные структуры, соответствующие радиокомпонентам искомым объектам. В качестве исходного обзора неба был выбран NVSS [9]. Обзор покрывает значительную часть неба (82%) и содержит около 1.8 миллиона дискретных радиоисточников. Мы использовали каталог NVSS, полученный автоматической процедурой выделения источников на основе гаусс-анализа (fitted version), большая часть объектов которого имеют масштабы порядка минуты дуги. Важно отметить, что этот размер не обязательно характеризует размеры реального источника. Подробно метод описан в работе [10]. Метод был успешно применён, в результате чего список гигантских радиогалактик был расширен на 16 объектов [11], что является значимым числом для столь малочисленных объектов на момент поиска, когда их было известно всего около 200. Впоследствии число известных ГРГ постоянно увеличивалось. Так, в работе 2018 года [13] приводится каталог уже из 349 объектов данного типа. Дополнительным результатом явилось обнаружение среди ГРГ радиогалактик с признаками слияния [12]. Метод нашёл применение в работах других авторов [14].

Во-вторых, мы хотели проверить, как ГРГ могут проявлять себя в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне. Этот интерес вызван предполагаемым эффектом Сюняева-Зельдовича [15], создаваемым протяженными облаками плазмы, которые формируются радиоисточником. Предсказывается, что этот эффект должен быть существенен для гигантских радиогалактик ввиду их колоссальных линейных размеров [7]. Проверка этого предположения осуществлялась на подвыборке ГРГ, ограниченных снизу также угловыми размерами от 4 минут дуги [16].

Оказалось, что ГРГ действительно выделяются в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне, однако не так, как предполагалось - они демонстрируют сигнал в миллиметровом диапазоне и его отсутствие в субмиллиметровом [16]. Видимо, за формирование такого спектра ответственен другой механизм, не связанный с эффектом Сюняева-Зельдовича.

Чтобы исследовать это явление, нам необходимо было оценить спектр мощности ГРГ, для чего мы построили модель распределения ГРГ на небесной сфере [17]. Морфология моделируемых объектов базируется на статистических распределениях наблюдаемых параметров протяженных радиоисточников из обзора WENSS [18]; статистика по потоку основана на методе подсчета радиоисточников из работы [19], впоследствии пересчитанная в интересующий нас миллиметровый диапазон на основе наших работ по исследованию радиоисточников в миллиметровом диапазоне [20, 21, 22]. Стоит отметить, что модель создавалась для распределения протяженных радиоструктур на небе и впоследствии была применена для нашей задачи исследования ГРГ, поэтому благодаря заложенной гибкости

может быть использована и развита для других задач, например для анализа данных проекта Миллиметрон и иных миллиметровых обзорах.

В результате мы смогли сравнить предполагаемый спектр мощности ГРГ, обусловленный эффектом Сюняева-Зельдовича, с модельными данными, основанными на наблюдательной статистике ГРГ. Оценки также показали, что ГРГ проявляют себя на картах СМВ. Естественный следующий шаг - могут ли другие радиоисточники давать схожий эффект. Результатом этого предположения явился метод быстрого поиска кандидатов в объекты с эффектом Сюняева-Зельдовича в направлении на радиоисточники [23]. Алгоритм основан на выявлении локального минимума на низкочастотных картах Planck и локального максимума на высокочастотных в окрестностях радиоисточника, что соответствует перераспределению энергии между частотами за счёт эффекта Сюняева-Зельдовича. Было показано, что при тщательном анализе с применением этого метода количество обнаруженных объектов с эффектом Сюняева-Зельдовича может возрастать до десятков тысяч, что в несколько раз превышает число объектов, полученных по отождествлениям с обзорами SDSS и WISE, а также по результатам наблюдений на специализированном инструменте АСТ (Atacama Cosmology Telescope).

Общий вид структуры исследования обобщён в виде схемы, приведенной ниже Рис. 1

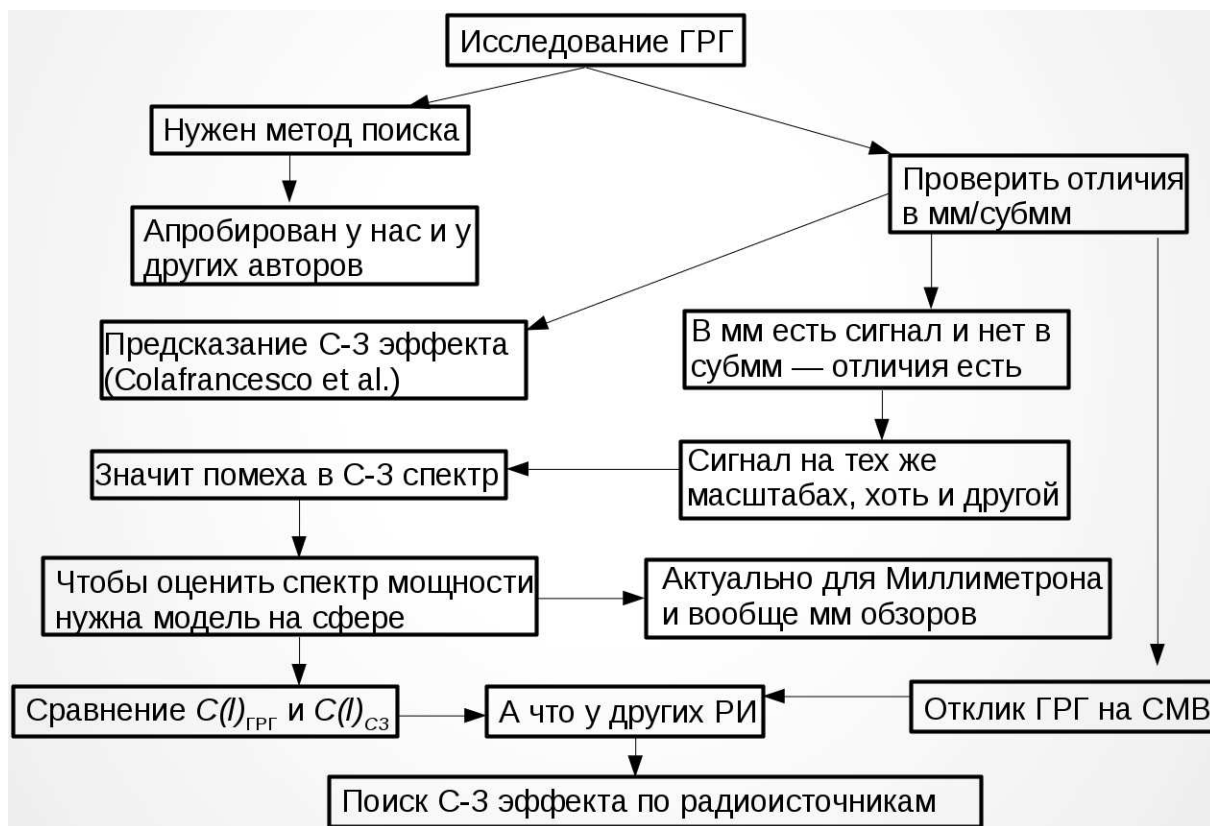


Рис. 1: План исследований, проводимых в рамках диссертационной работы.

Научная новизна работы

Впервые были получены следующие результаты:

- Новый метод поиска ГРГ, основанный на автоматической процедуре и последующем дополнительном визуальном контроле. Метод позволяет находить кандидаты в радиогалактики с заданными параметрами (угловые размеры, радиопотоки и др.) на основании морфологической классификации Фанарофф-Райли [8]. Результаты работы метода, а также его описание, представлены в статье [10].
- Результаты исследования новых ГРГ. Полученный описанным ранее методом список кандидатов в ГРГ был совмещён с уже известными ГРГ, а также проведено отождествление в других диапазонах. Список новых объектов, а также результаты их исследования, представлены в статье [11].
- Новые данные о ГРГ в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах по наблюдательным архивам Planck [24].
- Новая модель распределения ГРГ. На основании дополненного списка ГРГ с привлечением данных RCR была составлена модель распределения ГРГ по небесной сфере, подробно описанная в работе [17].
- Новый метод поиска кандидатов в скопления галактик по эффекту Сюняева-Зельдовича.

Практическая значимость

- Предложен метод селекции протяженных объектов по распределению радиояркости в архивных данных радиоастрономических обсерваторий, благодаря которому расширен список ГРГ и который дает возможность продолжить поиск подобных объектов на меньших плотностях потоков; это, в свою очередь, помогает глубже исследовать различные физические и статистические свойства ГРГ.
- Построена модель распределения протяженных объектов в миллиметровом диапазоне, которая может быть применена при анализе неоднородностей в миллиметровом диапазоне, в том числе и для будущего проекта "Миллиметрон".
- Предложен метод отбора СЗ-объектов, который ускоряет селекцию кандидатов в несколько раз.

Основные результаты, выносимые на защиту

На защиту выносятся следующие результаты работы:

1. Новый метод обнаружения ГРГ из анализа морфологии NVSS-радиоисточников, на основе которого были обнаружены 16 новых ГРГ. Они были отождествлены в оптическом, ИК- и рентгеновском диапазонах.
2. Результаты исследований различных популяций радиогалактик по данным обзора Planck, которые впервые выявили отличительные особенности ГРГ в миллиметровом диапазоне: наличие положительного сигнала на картах Planck и плоский спектр. Предполагаемый эффект Сюняева-Зельдовича на протяженных компонентах радиогалактик не обнаружен.
3. Новый метод отбора кандидатов в объекты с эффектом Сюняева-Зельдовича в направлении на космические радиоисточники на основе анализа данных миссии Planck из поиска локальных минимумов в низкочастотных картах и максимума в высокочастотных картах. Применение данного метода ко всей сфере потенциально расширяет число объектов с эффектом Сюняева-Зельдовича до теоретически предсказываемого числа.
4. Результаты анализа новой предложенной модели распределения протяженных радиоисточников на полной сфере и создание общедоступного программного обеспечения для обслуживания этой модели. На основании этой модели и имеющихся статистических данных предсказано, что популяция ГРГ способна внести заметный вклад в фоновое излучение неба, которое служит основой исследований реликтового фона.

Достоверность

Радиоспектры ГРГ согласуются для различных данных радиообзоров, а моделирование даёт согласующиеся с ожидаемыми от наблюдений распределения.

Все результаты апробированы на девяти конференциях.

Апробация работы

Результаты работы были представлены на следующих конференциях

- Поиск гигантских радиогалактик в обзоре NVSS.
XXVIII конференция "Актуальные проблемы внегалактической астрономии" (Пушино, 2011)

- "Радио и оптическое отождествление гигантских галактик из NVSS"
Всероссийская астрономическая конференция «Многоликая Вселенная» (ВАК-2013, Санкт-Петербург, 2013)
- "Отождествление радиоисточников RC-каталога с крутыми спектрами на картах космической миссии PLANCK"
Всероссийская астрономическая конференция «Многоликая Вселенная» (ВАК-2013, Санкт-Петербург, 2013)
- "Поиск и исследование гигантских радиогалактик"
Конкурс-конференция работ сотрудников САО (2014)
- "Радиогалактики с признаками слияния из списка кандидатов в ГРГ по данным обзора NVSS"
XXXI конференция "Актуальные проблемы внегалактической астрономии"(Пушино, 2014)
- "Исследование источников RCR-каталога в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах по данным миссии Planck"
XXXII конференция "Актуальные проблемы внегалактической астрономии"(Пушино, 2015)
- устный (в соавторстве):
Моделирование распределения радиогалактик на сфере.
XXXIII конференция "Актуальные проблемы внегалактической астрономии"(Пушино, 2016)
- устный (в соавторстве):
Радиогалактики разных популяций в микроволновом диапазоне по данным Planck.
XXXIII конференция "Актуальные проблемы внегалактической астрономии"(Пушино, 2016)
- Селекция кандидатов в скопления галактик с эффектом Сюняева-Зельдовича по данным радиообзоров и карт миссии Planck.
"XXXIV Всероссийская конференция. Актуальные проблемы внегалактической астрономии"(Пушино, 2017)

Личный вклад

- Равный вклад при обсуждении и постановке задач.
- Равный вклад при подготовке публикаций.
- Обработка и анализ наблюдательных и смоделированных данных в пакетах GLESP и SExtractor.
- Разработка необходимого программного обеспечения на языке C, а также bash и иных командных интерпретаторах.

Краткое содержание работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения; полный объём диссертации 136 страницы текста, включая 53 рисунка и 7 таблиц. Список литературы содержит 225 наименований.

Во **Введении** обосновывается актуальность работы, раскрывается предмет исследования, формулируются цели и задачи, новизна, достоверность, практическая значимость, выносимые на защиту основные результаты, а также приводится список публикаций по теме диссертации и апробаций на конференциях.

В **Первой главе** предложен новый метод процедуры поиска новых гигантских радиогалактик, а также их отождествление и исследование.

Во **Введении к первой главе** обосновывается важность расширения каталога ГРГ. На момент работы над алгоритмом поиска общее число известных объектов этого типа было невелико - около 200, и любое расширение этого числа было значимо. Кроме того, в силу значительных размеров вблизи ГРГ могут наблюдаться искажения фона, обусловленные эффектом Сюняева-Зельдовича [7]. Такой добавочный сигнал приводит к искажению спектра мощности на угловых масштабах 5-10 минут, но не учитывается в стандартных моделях, использующих подсчёты источников. Предложенный метод поиска учитывает в том числе и угловые размеры источников, что важно при анализе вклада исследуемых объектов в фоновое излучение неба.

В разделе **Процедура селекции кандидатов в ГРГ** подробно описывается метод поиска кандидатов в гигантские радиогалактики. Алгоритм состоит из двух этапов и основан на анализе морфологии радиоисточников. Поскольку большая часть известных ГРГ принадлежат к морфологическому типу FR II [8], в основе алгоритма лежит предположение о существовании двух выделенных протяженных радиоструктур, разрешаемых на отдельные источники. В качестве исходного обзора неба был выбран обзор NRAO VLA Sky Survey (NVSS) [9]. Обзор покрывает значительную часть неба (82%) и представлен как в виде FITS изображений, так и каталога из 1.8 миллиона радиоисточников. Наблюдения проводились на частоте 1.4 ГГц с чувствительностью 2.5 мЯн. На первом этапе проводилась автоматическая селекция кандидатов, для чего радиоисточники из NVSS проходили проверку по следующим параметрам:

- Расстояние между радиокомпонентам в диапазоне от 4' до 6'

- Размер радиокомпоненты свыше $1'$
- Сонаправленность осей компонент в пределах 10°
- Суммарная спектральная плотность потока радиоизлучения от радиокомпонент от 100 мЯн

Полученные в результате автоматической процедуры кандидаты в ГРГ переходили ко второму этапу селекции в виде визуального контроля.

Алгоритм автоматической селекции захватывал некоторые ошибочные источники, в первую очередь речь идёт об областях НШ в плоскости галактики. После второго этапа был сформирован список из 50 кандидатов в ГРГ, чьи угловые размеры превышают 4 минуты дуги.

В разделе **Отождествление** прошедшие визуальный контроль кандидаты идентифицируются со списком уже известных ГРГ, а также описывается процесс отождествления в оптическом (с помощью каталога DSS2), инфракрасном (с помощью каталога 2MASS) и радио диапазонах (использовалась база данных CATS [26, 27]). По результатам работы было выявлено 16 новых объектов, для которых были получены оценки линейных размеров и таким образом подтвержден статус ГРГ.

В разделе **Комментарии по отдельным источникам** детально описываются все найденные радиогалактики, приводятся их отождествления, известные имена в других каталогах и характерные морфологические особенности.

Полученные в Главе 1 совместные результаты диссертанта опубликованы в работах [10, 11].

Во **Второй главе** исследуются радиогалактики с признаками слияния из списка кандидатов в ГРГ.

Во **Введении ко второй главе** даётся подробное описание радиогалактик с необычной морфологией. Наличие мощного радиоизлучения в радиогалактике является признаком случившегося слияния галактик, которое инициирует активность центральной машины радиоисточника. Одним из наблюдаемых следствий процесса слияния является прецессия оси вращения сверхмассивной чёрной дыры и связанного с ней джета. Это проявляется во внешнем виде радиокомпонент, которые принимают S- или X-форму (X-shape radio galaxies). Описывается механизм воздействия на центральную машину и возможные наблюдаемые свойства. Ввиду наличия визуального контроля в методе поиска кандидатов в ГРГ, описанного в предыдущей главе, мы смогли выделить 8 объектов со сложной морфологией, 4 из которых соответствуют радиогалактикам с S-формой, 3 - с X-формой, и один объект демонстрирует активность в обоих ядрах. Таким образом, среди малочисленного класса ГРГ и кандидатов в эти объекты имеются объекты, демонстрирующие различные стадии слияния.

В разделе **Отождествление** подробно описывается процесс отождествления исследуемых объектов и поиска кандидатов в родительские галактики. Отождествление в оптике

осуществлялось с помощью оцифрованного Паломарского обзора неба (DSS), в инфракрасном диапазоне использовался каталог инфракрасного обзора 2MASS [28], а для радиоотожествления – база данных CATS [26, 27]. Для исследуемых объектов были построены радиоспектры и получены их аппроксимации в виде $\lg S(\nu) = A + Bx + Cf(x)$, где S – спектральная плотность потока в Ян, x – логарифм частоты ν в МГц, и $f(x)$ – одна из следующих функций $\exp(-x)$, $\exp(x)$ или x^2 .

В подразделе **Комментарии к источникам** описываются особенности исследуемых объектов.

В разделе **Заключение по галактикам с признаками слияния** подводятся итоги исследования радиогалактик с признаками слияния, обнаруженных нами в списке кандидатов в ГРГ. Обобщаются их свойства - сложная морфология и крутой непрерывный спектр. Отмечается, что три объекта из выборки присутствуют на картах микроволнового фона, причём один из них (J031821.9+682932) замечен на карте очищенного реликтового излучения. Для двух источников удалось подтвердить их принадлежность к классу ГРГ, то есть получить оценку их линейного размера, превышающего 1 Мпк.

Полученные в Главе 2 совместные результаты диссертанта по исследованию кандидатов в ГРГ с признаками слияния опубликованы в работе [12].

В **Третьей главе** описывается исследование свойств радиоисточников разных популяций, проявляющих себя в микроволновых картах неба миссии Planck.

В **Описании метода** рассказывается о методе стекинга (stacking), с помощью которого исследуются свойства радиоисточников. Суть метода заключается в осреднении площадок вокруг объектов исследуемой выборки в заданном диапазоне длин волн. Метод широко используется при анализе популяций слабых радиоисточников [29, 30, 31, 32]. В данной главе метод стэкинга применён для выборок популяций gE галактик, являющихся родительскими для ГРГ, а также для выборок сравнения gE, связанными с другими классами объектов.

В разделе **Выборки** описываются популяции исследуемых объектов. В подразделе **Гигантские радиогалактики** представлена выборка сравнения ГРГ с линейными размерами свыше 1 Мпк и угловыми размерами свыше $4'$, скомпанованная на основе работ [10, 11, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48]. Приводится таблица с объектами выборки. В подразделе **Выборки сравнения** описываются дополнительные выборки, к которым также применяется аналогичный метод исследования. Первая выборка сравнения сформирована из радиоисточников обзора WENSS [18], отобранных в диапазоне прямых восхождений $0^h \leq R.A. < 2^h$, которые уже исследовались ранее в микроволновом диапазоне [49]. Вторая выборка сравнения представляет собой список далёких ($z > 0.3$) радиогалактик и описана в работах [50, 51, 52]; данная выборка также уже использовалась в исследованиях данных микроволнового фона [53]. Третья выборка сравнения состоит из гигантских эллиптических галактик из списка скоплений [54], которые уже использовались ранее как дополнительные при исследовании радиогалактик [55].

Для сравнительного анализа также были использованы объекты из списков GRB космических обсерваторий BATSE [56] и ВерроSAX [57], отклик CMB и результаты стэкинга для которых исследовались в работах [58, 59].

В разделе **Средний популяционный микроволновый сигнал** описывается процедура стекинга. Мы использовали многочастотные карты архива космической миссии Planck [3], а также карту CMB SMICA, построенную методом разделения компонент многочастотного сигнала [61]. Для обработки использовались пакеты GLESP [62] и SExtractor [63]. Изучение и сравнение подвыборок объектов разных популяций проведено по двум направлениям: исследования среднего сигнала по данным карты CMB Planck и среднего спектра по данным измерения термодинамической температуры на различных частотах. В разделе **Заключение** подводятся итоги описанного в главе сравнения различных популяций радиоисточников. Показано, что средняя ГРГ из нашей выборки демонстрирует следующие особенности в микроволновом диапазоне:

1. положительный сигнал в миллиметровом диапазоне
2. плоский спектр в миллиметровом диапазоне.
3. сигнал в субмиллиметровом диапазоне не обнаружен
4. топологические свойства на средней карте флуктуаций CMB имеют особенности: слабый незначимый пик ($< 1\sigma$) находится в зоне минимума;
5. не удалось обнаружить значимый эффект Сюняева-Зельдовича, предсказанный в работе [7]

Полученные в Главе 3 совместные результаты диссертанта опубликованы в работе [25].

В **Четвертой главе** описывается построение и применение модели распределения протяженных радиоисточников на сфере.

В разделе **Введение к четвертой главе** даётся общая информация об актуальности построения моделей фонового электромагнитного излучения на сфере, в частности широко используемое моделирование распределения космического микроволнового фона [1, 3]. Существенным искажающим фактором при восстановлении распределения CMB на высоких гармониках ($\ell > 2000$) является вклад в общую наблюдаемую картину протяженных радиоисточников [2]. Для анализа их вклада была разработана и реализована процедура моделирования протяженных источников на полной сфере с возможностью вывода ограниченных площадок неба в рамках пакета GLESP [62]

В разделе **Построение модели** приводится детальное описание алгоритмов и данных, на которые опирается модель.

- распределение радиоисточников по спектральным плотностям потоков: кривая $'\log N - \log S'$ [19];

- распределение протяженных источников по размерам, морфологии и позиционным углам на основе каталогизированных протяженных источников обзора WENSS [18];
- распределения по спектральным индексам для гигантских радиогалактик по данным РАТАН-600 и других радиотелескопов [50, 51, 52], применяемые для калибровки модели;
- данные о среднем отклике в микроволновом диапазоне длин волн для радиогалактик разных классов и калибровочные зависимости перехода от плотностей потока к термодинамическим температурам [20, 21, 22, 24, 25].

В подразделе **Морфология радиоисточников** описывается построение формы и ориентации протяженных объектов. Основой для статистики по протяженным радиоисточникам послужил каталог обзора северного неба на Вестерборкском радиотелескопе (The Westerbork Northern Sky Survey — WENSS) [18]. Обзор проведён на частоте 325 МГц и имеет предельный поток на уровне около 18 мЯн ($\sim 5\sigma$) и покрывает северную часть неба выше 29° по склонению. Важным свойством каталога WENSS является маркирование всех протяженных источников, которое позволило голландской группе подготовить новые списки ГРГ [4, 5].

Протяженные источники представлялись в модели в виде либо двухкомпонентного объекта, соответствующего морфологическому типу FR II [8], либо однокомпонентного, соответствующего морфологическому типу FR I. Общее число источников из WENSS, использованных для построения модели, составляет 24828 одиночных и 10586 двойных. Морфология моделируемых объектов базируется на следующих зависимостях:

- распределение величин больших и малых осей;
- зависимость между большой и малой осью источника;
- зависимость между осями компонент двойного источника;
- распределение расстояния между компонентами двойного источника;
- зависимость между расстоянием между компонентами и большой осью;

Сгенерированные объекты были равномерно распределены по небесной сфере. Поскольку позиционные углы радиоисточников WENSS распределены существенно неравномерно (что связано, по всей видимости, с наблюдательными селекционными эффектами), в модели этот параметр описывается случайным равномерным распределением.

В подразделе **Плотность потока** описывается построение плотности потока моделируемых объектов на основе дифференциальной кривой подсчётов радиоисточников $\log N - \log S$ на частоте 1.4 ГГц из работы [19]. Моделирование параметра плотности потока проводилось в логарифмических бинах. Для пересчета плотности потока с низких

частот в микроволновой диапазон использовалось линейное приближение аппроксимации континуальных радиоспектров галактик со спектральным индексом $\alpha = -0.77$ ($S \sim \nu^\alpha$), полученных по данным радионаблюдений и отождествлений [52, 10, 11].

В разделе **Спектр мощности** описывается анализ реализаций описанной выше модели. Было сгенерировано 200 реализаций радиоисточников с угловым размером $\theta > 4'$. Таких источников согласно рассматриваемой модели — 294. Сгенерированные карты были сглажены гауссианой размером 10 угловых минут, соответствующей удвоенному разрешению карт обсерватории Planck. Спектр мощности $D_\ell = \ell(\ell + 1)C_\ell/2\pi$ показан на рис. 2

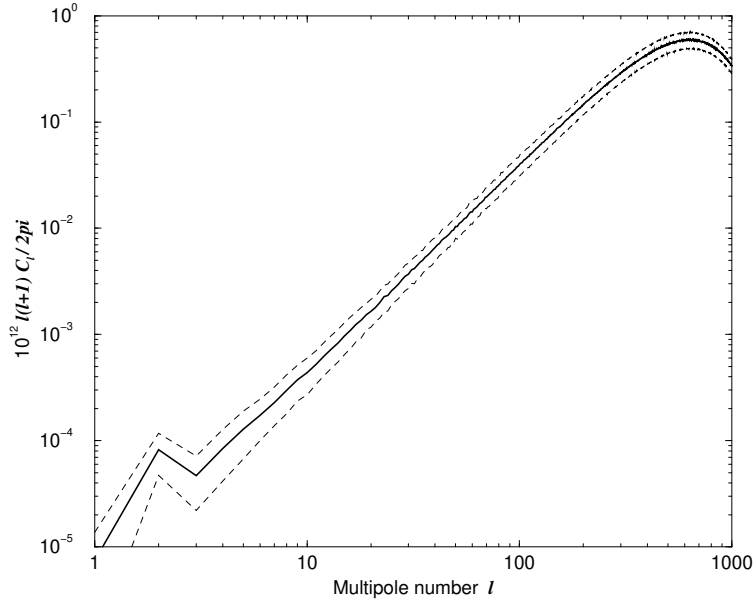


Рис. 2: Угловой спектр мощности $D_\ell = \ell(\ell + 1)C_\ell/2\pi$ сглаженной до $10'$ карты моделированного микроволнового излучения на длине волны 3 мм от протяженных радиоисточников с угловым размером $\theta > 4'$. Сплошной линией показан средний спектр, рассчитанный по 200 случайным реализациям положений и форм протяженных радиоисточников. Пунктирными линиями отмечены границы разброса на уровне $\pm 1\sigma$ от среднего. Совместный результат диссертанта из работы [17].

В разделе **Заключение** подводятся итог построения модели протяженных радиоисточников на сфере. Делается вывод на основе описанной в главе работы о том, что вклад протяженным радиоисточников в миллиметровом диапазоне должен искажать угловой спектр мощности, обусловленный эффектом Сюняева-Зельдовича. Отмечается, что модель может быть приспособлена для других работ, в частности связанных с построением функции светимости протяженных радиогалактик вплоть до больших красных смещений ($z \sim 6$) [64] и расширения ее с помощью новых моделей распределения источников [65, 66], разрабатываемых для космического эксперимента “Миллиметрон” [67].

Полученные в Главе 4 совместные результаты опубликованы в работе [17].

В **Пятой главе** описывается процедура поиска кандидатов в объекты с эффектом Сюняева-Зельдовича в окрестности радиоисточников.

Во **Введении к пятой главе** рассказывается об актуальности выделения объектов с эффектом Сюняева-Зельдовича на картах космического микроволнового фона ввиду сложности их поиска и частичном прохождении в очищенные карты.

В разделе **Данные Planck** подробно рассказано о используемых в данной главе картах микроволнового фона, представленных в частотных картах Planck на девяти частотах микроволнового диапазона: 30, 44, 70, 100, 143, 217, 353, 545 и 847 ГГц. В результате действия теплового эффекта Сюняева-Зельдовича энергия фотонов микроволнового фона будет перераспределяться на высокоэнергичных электронах из низких частот на более высокие. В данных Planck это проявится в виде локального минимума на низкочастотных картах 30-143 ГГц и локального максимума на частоте 217 ГГц. Поскольку для возникновения заметного рассеяния реликтовых фотонов необходимо наличие горячего газа, то именно в скоплениях галактик эффект будет наиболее сильным, что многократно подтверждено сопоставлением рентгеновских карт и микроволновыми измерениями [60].

В разделе **Построение алгоритма** последовательно описывается селекция объектов, в направлении на которые предлагается искать эффект Сюняева-Зельдовича и алгоритм селекции кандидатов в объекты с искомым эффектом. В настоящей работе была выбрана подгруппа радиисточников WENSS в диапазоне прямых восхождений $0^h < \alpha < 2^h$ и склонений $20^\circ < d < 76^\circ$. Алгоритм отбора кандидатов содержит несколько этапов:

1. Вырезание зоны в окрестности радиисточников низкочастотного каталога WENSS [18] из карт микроволнового излучения размером $30' \times 30'$: на частотных картах 100, 143, 217, 353, 545 ГГц и карте реликтового излучения, превышающей размер диаграммы направленности на частоте 217 ГГц примерно в 6 раз (и в три раза поисковый размер, используемый при анализе данных в работах Planck [68]).
2. Выделение потенциальных источников с помощью стандартной программы поиска ‘*SExtractor*’ [63] в радиусе 7 минут дуги от центра площадки (при ширине диаграммы направленности радиотелескопа $\sim 5'$) на частотах 100 и 143 ГГц — с отрицательной амплитудой сигнала, а на 353 и 545 ГГц — с положительной.
3. Сравнение амплитуды сигнала детектированного источника на частотах 100 и 143 ГГц: $|S_{100}| > |S_{143}|$ и наличие источника с положительной амплитудой на частоте 217 ГГц.
4. Контроль отобранных объектов осуществлялся визуальным методом.
5. Дополнительный контроль - проверка наличия минимума на карте реликтового излучения с удаленными низкими ($\ell \leq 20$) мультиполями. Удаление низких мультиполей, содержащих статистически анизотропный сигнал [69], уменьшает искажения в площадках, что, в свою очередь, увеличивает контраст меньших неоднородностей. Минимум на карте СМВ наблюдается в направлении скопления галактик с эффектом

Сюняева-Зельдовича. Он образуется в результате выполнения процедуры разделения компонент [61].

Графически алгоритм представлен на блок-схеме 3

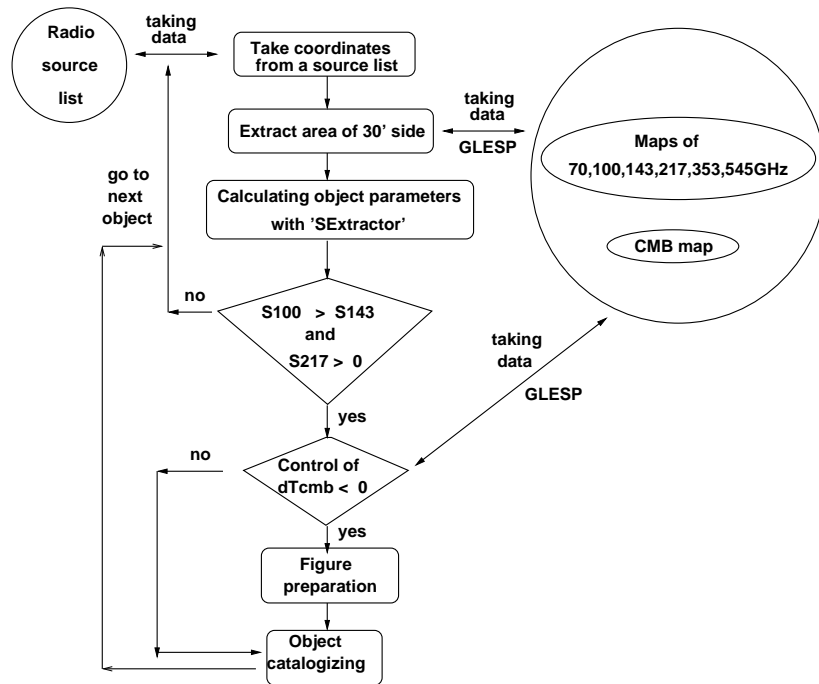


Рис. 3: Блок-схема селекции кандидатов в объекты с эффектом Сюняева-Зельдовича в окрестности радиоисточников. Совместный результат диссертанта из работы [23]

В разделе **Результаты** приводится каталог кандидатов в объекты с эффектом Сюняева-Зельдовича, полученный в результате работы алгоритма. Распределение по спектральным индексам позволяет выделить популяцию источников с предпочтительным наклоном радиоспектра, который описывает радиоизлучение объекта в скоплении с наблюдаемым эффектом Сюняева-Зельдовича. Медианное значение спектрального индекса выборки на частоте 1.4 ГГц оказалось равным -0.79 . Дополнительным свойством выборки, характеризующим популяцию, является отрицательное медианное значение сигнала на карте неоднородностей CMB SMICA, построенной в диапазоне мультиполей $\ell \in [21 - 2500]$, в направлении на радиоисточник. Приводится статистика отождествлений кандидатов.

В разделе **Заключение** делаются выводы по описанной в главе работе:

1. Существуют кандидаты в объекты со слабо наблюдаемым эффектом Сюняева-Зельдовича на картах миссии Planck, причём на полной сфере их ожидаемое число, как минимум, в $10 \div 30$ раз больше, чем в опубликованных списках. Наличие этих объектов позволяет сказать, что противоречия между ожидаемым числом скоплений галактик с СЗ-эффектом и зарегистрированным нет.
2. Эффект “ямки” на карте CMB при отборе кандидатов в СЗ-объекты по радиоисточникам есть. И это позволяет проводить независимое тестирование на существование

скопления галактик в области расположения радиоисточника. Отметим, что такой отрицательный сигнал образуется как остаточный эффект после процедуры разделения компонент излучения без учета априорной информации о наличии массивного скопления галактик (с существующим СЗ-эффектом) в данном направлении на небе.

3. В полях радиоисточников часто наблюдается родительский объект, излучение от которого остается на карте СМВ, полученной в результате разделения компонент протяженного фонового сигнала. Несмотря на множественные обнаружения подобных радиоисточников на карте СМВ, они не вносят существенного вклада в определение космологических параметров, так как привносят искажения лишь в высокочастотную часть углового спектра мощности. Эта область менее значима, чем низкочастотная, при определении космологических параметров.
4. Радиоисточники в скоплениях галактик могут “замазывать” эффект Сюняева-Зельдовича в миллиметровом диапазоне длин волн. Это уменьшает возможность обнаружить эффект.

Важно отметить, что предложенный метод поиска скоплений галактик с эффектом Сюняева-Зельдовича радиоисточникам также позволит искать похожие объекты с большими красными смещениями ($z > 1$), которые не видны в [70] в силу селекционных эффектов.

Описанный в Главе 5 метод опубликован как совместный результат диссертанта в работе [23].

В **Заключении** подводятся итоги проведенной работе, освещаются основные результаты и перспективы дальнейшего развития темы исследований.

Публикации по теме диссертации

- D.I. Solovyov, O.V. Verkhodanov. A Search for Faint Giant Radio Galaxies in the NVSS Survey. *Astrophys. Bull.*, V.66, No.4, p.416-423 (2011).
- D. I. Solovyov, O. V. Verkhodanov. Radio and Optical Identification of Giant Radio Galaxies from NVSS Radio Survey. *Astrophys. Bull.* v.69, N2, p.141-159 (2014).
- Д.И. Соловьев, О.В. Верходанов. Поиск и исследование слабых радиогалактик большого углового размера по данным обзора NVSS. *Астрон. Ж.*, т.91, No8, с.592-602 (2014).
- Д. И. Соловьев, О. В. Верходанов. Радиогалактики с признаками слияния из списка кандидатов в гигантские радиогалактики по данным обзора NVSS. *Письма в А.Ж.*, том 40, No 10, с. 671-680 (2014).

- О. В. Верходанов, Е.К.Майорова, О. П. Желенкова, Д.И.Соловьев, М.Л.Хабибуллина. Источники RCR-каталога с крутыми спектрами в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах по данным миссии Planck. Письма в АЖ, v.41, No. 9, pp. 499-515 (2015).
- О.В.Верходанов, Е.К.Майорова, О.П.Желенкова, Д.И.Соловьев, М.Л.Хабибуллина. Источники RCR-каталога с нормальными и плоскими спектрами по данным микроволнового обзора Planck. АЖ 93, 616-641 (2016).
- O.V.Verkhodanov, D.I.Solovyov, O.S.Ulakhovich, M.L.Khabibullina, E.K.Majorova, Radio galaxies of different populations on the Planck mission maps. Astron. Rep. 61, 297-298 (2017)
- D. I. Solovyov, O. V. Verkhodanov. Modeling of giant radio galaxy distribution over the sphere in the millimeter-wavelength range. Astrophys.Bull. 72, Iss.3, p.217-223 (2017).
- O.V. Verkhodanov, N.V. Verkhodanova, O.S. Ulakhovich, D.I. Solovyov, M.L.Khabibullina. Search for Candidate Objects with the Sunyaev-Zeldovich Effect in the Radio Source Vicinities. Astrophys. Bull. 73, Iss.1, p.1-21 (2018).

Список литературы

- [1] *C. L. Bennett, D. Larson, J. L. Weiland, et al.*, Nine-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Final Maps and Results // *Astrophys. J. Suppl.* – 2013 – Vol. 208 – p. 20.
- [2] *Planck Collaboration: P. A. R. Ade, et al.*, Planck 2013 results. I. Overview of products and scientific results // *Astron. & Astrophys.* – 2013 (submitted).
- [3] *Planck Collaboration* Planck 2015 results. I. Overview of products and results // *Astron. & Astrophys.* – 2015 (submitted).
- [4] *A. P. Schoenmakers, K. H. Mack, A. G. de Bruyn, et al.* A new sample of giant radio galaxies from the WENSS survey - II. A multi-frequency radio study of a complete sample: Properties of the radio lobes and their environment // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* – 2000 – Vol. 146 – p. 293.
- [5] *A. P. Schoenmakers, A. G. de Bruyn, H. J. A. Roettgering, and H. van der Laan*, A new sample of giant radio galaxies from the WENSS survey - I. Sample definition, selection effects and first results // *Astrophys. J.* – Vol. 374 – 2001 – p. 861.
- [6] *M. Jamrozy, J. Machalski, K. H. Mack, and U. Klein*, Ageing analysis of the giant radio galaxy J1343+3758 // *Astronom. and Astrophys.* – 2005 – Vol. 433 – p. 467.
- [7] *S. Colafrancesco and P. Marchegiani*, The energetics of giant radio galaxy lobes from inverse Compton scattering observations // *Astronom. and Astrophys.* – 2011 – Vol. 535 – A108.
- [8] *B. L. Fanaroff and J. M. Riley* The morphology of extragalactic radio sources of high and low luminosity // *MNRAS* – 1974 – Vol. 167 – pp. 31-36.
- [9] *J. Condon, W. D. Cotton, E. W. Greisen et al.*, The NRAO VLA Sky Survey // *Astronom. J.* – 1998 – Vol. 115, p. 1693.
- [10] *D. I. Solovyov, O. V. Verkhodanov*, A search for faint giant radio galaxies in the NVSS survey // *Astrophys. Bul.* – 2011 – Vol. 66 – pp. 416-423.
- [11] *D. I. Solovyov, O. V. Verkhodanov*, Radio and Optical Identification of Giant Radio Galaxies from NVSS Radio Survey // *Astrophys. Bul.* – 2014 – Vol. 69 – pp. 141-159.

- [12] *Д.И. Соловьев, О.В. Верходанов*, Радиогалактики с признаками слияния из списка кандидатов в гигантские радиогалактики по данным обзора NVSS // Письма в А.Ж. – том 40 – No 10 – с. 671-680.
- [13] *A. Kuzmicz, M. Jamroz, K. Bronarska, K. Janda-Boczar, and D. J. Saikia* An Update Catalog of Giant Radio Sources // The Astrophysical Journal Supplement Series – 2018 – Vol.238 – p.9
- [14] *D. D. Proctor*, A Selection of Giant Radio Sources from NVSS // Astrophys. J. Suppl. – 2016 – Vol. 224 – p. 18.
- [15] *Ya. B. Zeldovich and R. A. Sunyaev*, The Interaction of Matter and Radiation in a Hot-Model Universe // Astrophys. Sp. Sci. – 1969 – Vol. 4 – p. 301.
- [16] *O.V. Verkhodanov, D.I. Solovyov, O.S. Ulakhovich, M.L. Khabibullina*, A comparison of properties of different population radio galaxies based on the Planck mission microwave data // Astrophys. Bull. – 2016 – Vol. 71 – p. 139.
- [17] *D.I.Solovyov and O.V.Verkhodanov*, Modeling of giant radio galaxy distribution over the sphere in the millimeter-wavelength range // Astrophys. Bull. – 2017 – Vol. 72 – p. 217.
- [18] *R. B. Rengelink, et al.*, The Westerbork Northern Sky Survey (WENSS), I. A 570 square degree Mini-Survey around the North Ecliptic Pole // Astronom. and Astrophys. – 1997 – Vol. 124 – p. 259.
- [19] *J.J.Condon*, Cosmological evolution of radio sources found at 1.4 GHz // Astrophys. J. – 1984 – Vol. 284 – p. 44.
- [20] *O.V.Verkhodanov, E.K.Majorova, O.P.Zhelenkova, et al.*, Investigation of the RCR Catalog Sources in the Millimeter and Submillimeter Ranges Based on the Planck Mission Data // Astrophys. Bull. – 2015 – Vol. 70 – p. 156.
- [21] *O.V.Verkhodanov, E.K.Majorova, O.P.Zhelenkova*, Steep-spectrum sources of the RCR catalog in the millimeter and submillimeter ranges based on Planck data // Astronomy Lett. – 2015 – Vol. 41 – p. 457.
- [22] *O.V.Verkhodanov, E.K.Majorova, O.P.Zhelenkova, et al.* Sources of the RCR catalog with normal and flat spectra according to data from the Planck microwave survey // Astronomy Rep. – 2015 – Vol. 60 – p. 630.
- [23] *O.V. Verkhodanov, N.V. Verkhodanova, O.S. Ulakhovich, D.I. Solovyov, M.L.Khabibullina* Search for Candidate Objects with the Sunyaev-Zeldovich Effect in the Radio Source Vicinities // Astrophys. Bull. – 2018 – Vol. 73 – Iss.1 – p.1-21.

- [24] *O.V. Verkhodanov, D.I. Solovyov, O.S. Ulakhovich, and M.L. Khabibullina* A comparison of properties of different population radio galaxies based on the Planck mission microwave data // *Astrophys. Bull.* – 2016 – Vol. 71 – p. 139.
- [25] *O. V. Verkhodanov, D. I. Solovyov, O. S. Ulakhovich, et al.* Radio galaxies of different populations on the Planck mission maps // *Astron. Rep.* – 2017 – Vol. 61 – p. 297.
- [26] *O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach and V. N. Chernenkov* Current status of the CATS database // *Bull.SAO* – 2005 – Vol. 58 – p.118.
- [27] *O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach and V. N. Chernenkov,* The CATS Service: an Astrophysical Research Tool // *Data Science Journal* – 2009 – Vol. 8 – p.34.
- [28] *M.F. Skrutskie, R.M. Cutri, R. Stiening, M.D. Weinberg, S. Schneider, J.M. Carpenter, C. Beichman, R. Capps, T. Chester, J. Elias, J. Huchra, J. Liebert, C. Lonsdale, D.G. Monet, S. Price, P. Seitzer, T. Jarrett, J.D. Kirkpatrick, J. Gizis, E. Howard, T. Evans, J. Fowler, L. Fullmer, R. Hurt, R. Light, E.L. Kopan, K.A. Marsh, H.L. McCallon, R. Tam, S. Van Dyk, and S. Wheelock* The Two Micron All Sky Survey (2MASS) // *Astronomical Journal,* – Vol.131 – p.1163.
- [29] *Yu. N. Parijskij, N. S. Soboleva, O. V. Verkhodanov, et al.,* On observations of diffuse optical emission along the axis of double radio sources of RC catalog at the 6 m optical telescope // *Bull. SAO* – 1996 – Vol. 40 – p. 125.
- [30] *B. R. Granett, M. C. Neyrinck, and I. Szapudi,* An Imprint of Superstructures on the Microwave Background due to the Integrated Sachs-Wolfe Effect // *Astrophys. J.* – 2008 – Vol. 683 – L99.
- [31] *S. Ilic, M. Langer, M. Douspis,* Detecting the integrated Sachs-Wolfe effect with stacked voids // *Astron. Astrophys.* – 2013 – Vol. 556 – A51.
- [32] *Planck Collaboration;* Planck 2013 results. XIX. The integrated Sachs-Wolfe effect // *Astron. Astrophys.* – 2014 – Vol. 571 – A19.
- [33] *V. R. Amirkhanyan, V. L. Afanasiev, A. V. Moiseev,* New extended radio sources from the NVSS // *Astrophys. Bull.* – 2015 – Vol. 70 – p. 45.
- [34] *J. M. Malarecki, L. Staveley-Smith, L. Saripalli, et al.,* Giant Radio Galaxies: I. Intergalactic Barometers // *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* – 2013 – Vol. 432 – p. 200.
- [35] *J.M. Malarecki, D.H.Jones, L.Saripalli, et al.,* Giant radio galaxies - II. Tracers of large-scale structure // *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* – 2015 – Vol. 449 – p. 955.

- [36] *L. Saripalli, R. W. Hunstead, R. Subrahmanyam, and E. Boyce*, A complete sample of megaparsec-size double radio sources from SUMSS // *Astronom. J.* – 2005 – Vol. 130 – p. 896.
- [37] *A. P. Shoenmakers, A. G. de Bruyn, H.J.A. Rottgering, and H. van der Laan*, A new sample of giant radio galaxies from the WENSS survey. I. Sample definition, selection effects and first results // *Astron. Astroph. Suppl. Ser.* – 2000 – Vol. 146 – p. 293.
- [38] *A. P. Shoenmakers, K.-H. Mack, A.G. de Bruyn, et al.*, A new sample of giant radio galaxies from the WENSS survey. II A multi-frequency radio study of a complete sample: Properties of the radio lobes and their environment // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* – 2000 – Vol. 146 – p. 293.
- [39] *J. Machalski, K. T. Chyzy, and M. Jamrozy*, On the time evolution of giant radio galaxies 2002 (submitted).
- [40] *M.L. Khabibullina, O.V. Verkhodanov, M. Singh, et al.*, Radio spectra of giant radio galaxies from RATAN-600 data // *Astronomy Rep.* – 2010 – Vol. 54 – p. 571.
- [41] *M. L. Khabibullina, O. V. Verkhodanov, M. Singh*, A study of giant radio galaxies at RATAN-600 // *Astrophys. Bull.* – 2011 – Vol. 66 – p. 171.
- [42] *R.G. Hine*, Multifrequency observations of 4C 39.04: a powerful giant radio galaxy // *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* – 1979 – Vol. 189 – p. 527.
- [43] *I. J. Danziger, W. M. Goss, and R.H. Frater* The giant radio galaxies PKS 0211-47 and PKS 0634-20 // *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* – 1978 – Vol. 184 – p. 341.
- [44] *A. P. Shoenmakers, K.-H. Mack, L. Lara, et al.*, WNB 0313+683: analysis of a newly discovered giant radio galaxy // *Astron. Astrophys.* – 1998 – Vol. 336 – p. 455.
- [45] *P. A. Jones*, The Giant Radio Galaxy 0319-45 (MSH 03-43) // *PASAu* – 1989 – Vol. 8 – p. 81.
- [46] *L. Saripalli, R. Subrahmanyam, and R. W. Hunstead*, 0319-454: an FR II giant radio galaxy with twin jets // *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* – 1994 – Vol. 269 – p. 37.
- [47] *M. Jamrozy, J. Kerp, U. Klein, et al.*, ESO 422-G028: The host of a giant radio galaxy // *Balt. Astron.* – 2005 – Vol. 14 – p. 399.
- [48] *K. Chyzy, M. Jamrozy, S. J. Kleinman, et al.*, Redshifts measurement of distant giant radio galaxies // *Balt. Astron.* – 2005 – Vol. 14 – p. 358.
- [49] *O. V. Verkhodanov and O. S. Ulakhovich*, Search of features on Planck mission maps in the low frequency sources // XXXII Russian conf. “Modern problems of extragalactic astronomy”, Program and abstracts, – 2015 – p. 17.

- [50] *M. L. Khabibullina and O. V. Verkhodanov*, Catalog of radio galaxies with $z > 0.3$. I: Construction of the sample // *Astrophys. Bull.* – 2009 – Vol. 64 – p. 123.
- [51] *M. L. Khabibullina and O. V. Verkhodanov*, Catalog of radio galaxies with $z > 0.3$. II: Photometric Data // *Astrophys. Bull.* – 2009 – Vol. 64 – p. 276.
- [52] *M. L. Khabibullina and O. V. Verkhodanov*, Catalog of radio galaxies with $z > 0.3$. III: Angular sizes and flux density according to the NVSS data // *Astrophys. Bull.* – 2009 – Vol. 64 – p. 340.
- [53] *O. V. Verkhodanov, M. L. Khabibullina*, Statistics of WMAP ILC map temperature fluctuations towards distant radio galaxies // *Astrophys. Bull.* – 2011 – Vol. 66 – p. 183.
- [54] *S. A. Stanford, P. R. Eisenhardt, M. Dickinson Mark, et al.*, Optical and Near-Infrared Photometry of Distant Galaxy Clusters (optical and near-IR photometry of 45 clusters of galaxies at $0.1 < z < 1.3$) // *Astrophys. J. Suppl.* – 2002 – Vol. 142 – p. 153.
- [55] *O. V. Verkhodanov O.V., Yu. N. Parijskij, and A. A. Starobinsky*, Determination of Ω_Λ and H_0 from photometric data of radiogalaxies // *Bull. SAO* – 2005 – Vol. 58, – p. 5.
- [56] *W. S. Paciesas, C. A. Meegan, G. N. Pendleton, et al.* The Fourth BATSE Gamma-Ray Burst Catalog (Revised) // *Astrophys. J. Suppl.* – 1999 – Vol. 122 – p. 465.
- [57] *D. Riccia, F. Fioreb, and P. Giommia*, The Active X-ray Sky Results from BeppoSAX and RXTE // *Nuclear Physics B - Proc. Suppl.* – 1999 – Vol. 69 – p. 618.
- [58] *O. V. Verkhodanov, V. V. Sokolov, M. L. Khabibullina, and S.V.Karpov*, GRB Sky Distribution Puzzles // *Astrophys. Bull.* – 2010 – Vol. 65 – p. 238.
- [59] *M. L. Khabibullina, O. V. Verkhodanov, and V. V. Sokolov*, Statistics of the Planck CMB Signal in Direction of Gamma-Ray Bursts from the BATSE and BeppoSAX Catalogs // *Astrophys. Bull.* – 2014 – Vol. 69 – p. 472.
- [60] *M.Hasselfield, M.Hilton, T.A.Marriage*. The Atacama Cosmology Telescope: Sunyaev-Zel'dovich Selected Galaxy Clusters at 148 GHz from Three Seasons of Data // *JCAP* – 2013 – Vol. 07 – 008.
- [61] *Planck Collaboration*, Planck 2015 results. IX. Diffuse component separation: CMB maps // *Astrophys. Astrophys.* 2015(submitted).
- [62] *O. V. Verkhodanov, A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky et al.*, GLESP package for full sky CMB maps data analysis and its realization in the FADPS data processing system // *Bull. SAO* – 2005 – Vol. 58 – p. 40.
- [63] *E. Bertin and S. Arnouts*, SExtractor: Software for source extraction // *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* – 1996 – Vol. 117 – p. 393.

- [64] *A. Saxena, H. J. A. Rottgering, and E. E. Rigby*, Modelling the luminosities and sizes of radio galaxies: radio luminosity function at $z = 6$ // Monthly Notices Roy. Astronom. Soc. – 2016 (accepted).
- [65] *С.В.Пилипенко, М.В.Ткачев, А.А.Ермаш, и др.*, Модель ИК фона неба, учитывающая крупномасштабную структуру Вселенной // сб. “Актуальные проблемы внегалактической астрономии”, тез. док. XXXIV Всеросс. конф., Пушино, ПРАО АКЦ ФИАН – 2017 – с.10.
- [66] *А.А.Ермаш и С.В.Пилипенко*, К вычислению параметров внегалактического фона для миссии Миллиметрон // сб. “Актуальные проблемы внегалактической астрономии”, тез. док. XXXIV Всеросс. конф., Пушино, ПРАО АКЦ ФИАН – 2017 – с.10.
- [67] *Н.С. Кардашев, И.Д. Новиков, В.Н. Лукаш, и др.* Обзор научных задач для обсерватории Миллиметрон // УФН – 2014 – Vol. 184, с. 1319.
- [68] *Planck Collaboration: Ade P.A.R., et al.*, Planck 2015 results. XXVI. The Second Planck Catalogue of Compact Sources // Astron. Astrophys. – 2016 – Vol. 594 – A26.
- [69] *P.D.Naselsky, P.R.Christensen, P.Coles, et al.*, Understanding the WMAP Cold Spot mystery // Astrophys. Bull. – 2010 – Vol. 65 – p. 101.
- [70] *R. A. Burenin*, An extension of the Planck galaxy cluster catalogue // Astron. Lett. – 2017 – Vol. 43 – p. 507.