

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ

На правах рукописи

УДК 529.52;523.10;523.21;523.27;520.15;520.5-8

Хабибуллина Маргарита Леруновна

**Исследование радиогалактик как
космологических реперов**

Специальность: 01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Специальной Астрофизической Обсерватории
Российской Академии Наук.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук
О. В. Верходанов
(САО РАН)

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
А. Т. Байкова
(ГАО РАН)
г. Санкт-Петербург

доктор физико-математических наук,
профессор
В. А. Гаген-Торн
(СПбГУ)
г. Санкт-Петербург

Ведущая организация:

Астрокосмический центр Учреждения
Российской академии наук Физического
института им. П.Н.Лебедева
РАН (АКЦ ФИАН)
г. Москва

Защита состоится 14 апреля 2011г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 02.203.01 при Специальной Астрофизической Обсерватории Российской академии наук по адресу: 369167, САО РАН, п. Нижний Архыз, Карачаево-Черкесская республика, Россия

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке САО РАН.

Автореферат разослан 11 марта 2011г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физ.-мат. наук

Е. К. Майорова

Общая характеристика работы

Улучшение качества проводимых наблюдений и детальное моделирование космологических параметров, особенно после проекта COBE, который “считается стартовой точкой в космологии как точной науки”¹, позволило говорить о начале эпохи точной космологии. Несмотря на то, что последние космические и наземные эксперименты [1],[2] дали богатый материал для измерения параметров модели Вселенной и построения согласованной космологической модели, задача проверки соответствия используемой Λ CDM–парадигмы другим тестам остается актуальной, т.к. уровень точности определения параметров (H_0 , Ω_Λ , Ω_{DM} , Ω_b , Ω_k и др.) пока позволяет существование и других описаний [3]. Среди объектов, используемых для независимой проверки этих параметров, отметим радиогалактики (РГ) как одни из самых интересных. Они принадлежат популяции галактик самой высокой светимости, что делает возможным их изучение на больших красных смещениях и тем самым использовать как зонды состояния Вселенной в другие эпохи. Чрезвычайно важным моментом при исследовании этих объектов может считаться тот факт, что их родительскими галактиками являются гигантские эллиптические галактики (gE), которые могли бы использоваться (см., например, [4],[5]) как стандартные свечи/линейки. Отождествление с gE важно как при прослеживании эволюции звездных систем на больших красных смещениях, так и при поиске далеких групп галактик или протоскоплений, в центре которых они находятся, а также при исследовании процессов слияния и взаимодействия, на которые может указывать проявляющаяся активность их ядер.

В стандартной схеме формирования радиогалактик, радиоисточник загорается в результате слияния (мерджинга) галактик, образования аккреционного диска и джетов, наблюдаемых в радио и других диапазонах длин волн.

¹ Из заявления Новелевского комитета 2006 г. о награждении премией Дж.Смута и Дж. Матера

Как правило (см. обзоры в [6],[7]), самые мощные радиогалактики, видимые на больших красных смещениях, отождествляются с gE, являющимися в основном центральными галактиками скоплений. Тогда, используя каталог далеких радиогалактик, можно отследить положения скоплений и протоскоплений галактик, которые, в свою очередь, могут отразиться в реликтовом фоне как мешающий фактор [8].

Из этого следует **актуальность** данной работы, которую можно выделить в следующие пункты:

1. Переход к точным измерениям в космологии по данным WMAP и SDSS требует проверки согласованной космологической модели в других типах наблюдений. Радиогалактики, являясь одними из самых мощных наблюдаемых космических объектов, дают возможность исследовать эволюцию вещества и динамику расширения Вселенной в различные космологические эпохи.
2. Влияние свойств протяженных объектов на измеряемые параметры СМВ (Cosmic Microwave Background – космический микроволновый фон) остается до конца не изученным и требует проведения дополнительных исследований, особенно в эпоху миссии Planck.

Целью данной работы является:

1. Построение каталога далеких радиогалактик для проведения космологических тестов и определение их параметров.
2. Исследование статистических свойств популяции радиогалактик как класса объектов.
3. Получение, исследование радиоспектров гигантских радиогалактик (ГРГ) по данным наблюдений на РАТАН-600 и оценка их вклада в микроволновое излучение.
4. Исследование корреляционных свойств положения радиогалактик на сфере и особенностей распределения микроволнового фона.

Результаты, выносимые на защиту:

1. Создание выборки далеких радиогалактик ($z > 0.3$) и исследование статистических свойств этой популяции объектов.
2. Установление зависимости “спектральный индекс – красное смещение” ($\alpha(z)$) для популяции далеких радиогалактик.
3. Результаты измерения плотностей потоков ГРГ на РАТАН-600 и исследование их спектров.
4. Метод мозаичной корреляции протяженного излучения на сфере и положения радиогалактик и результаты его применения для анализа фоновых излучений и внегалактических объектов, а также обнаружение коррелированного сигнала в картах реликтового излучения WMAP и пылевой компоненты.

Новизна работы.

В работе получены следующие основные новые результаты:

1. **Построен каталог далеких радиогалактик.** Впервые определена аналитическая форма зависимости “спектральный индекс – красное смещение” для большой выборки далеких радиогалактик. Для них проанализированы статистические свойства в параметрическом пространстве красных смещений, спектральных индексов, плотности радиопотока, звездных величин, светимости, массы центральных черных дыр и установлены соответствующие регрессионные зависимости.
2. **Получены новые наблюдательные данные тринадцати гигантских радиогалактик.** В результате построены их непрерывные радиоспектры от дециметрового до сантиметрового диапазона длин волн. Сделаны оценки величины потока в миллиметровом диапазоне. Показана важность изучения подобных объектов в связи с возможным их влиянием на анизотропию реликтового излучения, особенно на масштабах скоплений галактик.
3. **Предложен метод картографирования корреляций различных компонент излучения,** в том числе и радиоисточников, на полной сфере, позволяющий проверять качество восстанавливаемых карт, их негауссовость и

проводить исследования в разных диапазонах длин волн.

4. Показано, что при очистке данных WMAP методом ИС пылевая компонента дает сильную антикорреляцию выделяемому СМВ, проявляющуюся как в распределении корреляционных коэффициентов, так и в угловом спектре мощности. Распределение корреляционных коэффициентов позволяет говорить о том, что эклиптическая и экваториальная система координат выделена в этом сигнале.

5. В карте корреляций положений коротких гамма-всплесков из разных каталогов, а также их корреляций с СМВ, обнаружены признаки выделенных систем координат: экваториальной и эклиптической, выражающиеся в положении полюсов. Также обнаружена корреляция положения длинных событий BATSE и флуктуаций СМВ, выделяющая экваториальную систему координат.

Научная и практическая ценность:

1. Каталог радиогалактик может использоваться для построения космологических тестов. Кроме космологических исследований, каталог позволяет детально проводить статистическое изучение списков отождествлений и соответствующих популяций объектов в различных диапазонах длин волн [9]-[12], поиск и изучение свойств подвыборок радиогалактик [13]-[17], моделирование радиоастрономических обзоров на РАТАН-600 [18]-[20].

2. Метод картографирования корреляций позволяет исследовать на сфере свойства случайного сигнала СМВ, имеющего единственную реализацию, основываясь только на его статистических свойствах, а именно эргодичности, когда по множеству реализаций реликтового излучения в разных областях сферы, можно сделать вывод о его реализации во множестве подобных Вселенных, и тем самым оценить его вероятные значения. Метод может быть применен, в частности, для исследования мозаичных карт корреляций в области эклиптической и экваториальной плоскостей данных миссии Planck.

Апробация

Результаты, содержащиеся в диссертационной работе, докладывались на общих семинарах САО РАН, конкурсе-конференции САО РАН, в институте имени Макса Планка (Германия, Бонн), а также на семинаре в обсерватории ARIES (Индия, Наинитал).

Кроме того, результаты были доложены на конференциях молодых европейских радиоастрономов (YERAC): 41-ой в Гетеборге (Швеция, 2008), 42-ой в Порту (Португалия, 2009), на конференциях “Актуальные проблемы внегалактической астрономии”: 25-ой и 26-ой в Пушино (2008, 2009), на Всероссийской конференции “От эпохи Галиллея до наших дней” в САО РАН (2010), международных конференциях: “Сахаровские Осцилляции и Радиоастрономия” в САО РАН (2007), “Problems of Practical Cosmology” в Санкт-Петербурге (2008), “Many faces of GRB phenomena - optics vs high energy” в САО РАН (2009).

Структура диссертации

Работа излагается в следующей последовательности: построение каталога далеких радиогалактик и статистический анализ выборки, изучение нескольких гигантских радиогалактик построенного каталога на РАТАН-600, исследование качества карт реликтового излучения предложенным методом. Выполненные исследования и полученные результаты изложены и оформлены в виде введения, трех глав, заключения и приложений.

Диссертация состоит из 3 глав, Введения, Заключения, 4 приложений и библиографии из 247 наименований. Содержит 133 страницы, включая 65 рисунков и 14 таблиц. Главы начинаются с введения в проблему и завершаются выводами.

Содержание диссертации

Введение

Во введении дается общая характеристика работы – обзор проблем в области наблюдательной космологии, решаемых радиоастрономическими методами. Обсуждаются тесты на основе радиоданных, связанные с определением космологических параметров.

Показана актуальность и поставлены цели работы. Отмечена научная новизна работы и приведены ее основные результаты. Далее кратко изложена структура диссертации. В заключении дается список статей, в которых опубликованы основные результаты работы

Глава 1. Исследование радиогалактик

Первая глава состоит из четырех частей и посвящена исследованию каталога далеких радиогалактик. В первой части приводится обзор современного состояния вопроса и показывается важность исследования радиогалактик.

В разделе 1.2 представлена процедура составления каталога и проведено статистическое исследование фотометрических и радиоданных, а также угловых размеров. Получена верхняя граница по плотностям потока в зависимости от красного смещения z , которая показывает максимальные светимости наблюдаемых радиогалактик на различных z , а также, по-видимому, формируется и динамикой космологического расширения. Впервые для такого объема объектов получена зависимость “спектральный индекс – красное смещение”, которая имеет заметный тренд в сторону понижения спектрального индекса и подчиняется зависимости $\alpha = a + bz$, где $a = -0.73 \pm 0.02$ – постоянная регрессии, а $b = -0.15 \pm 0.01$ – наклон. Обсуждаются селекционные эффекты, которые объясняют эту зависимость.

Раздел 1.3 посвящен сравнительному анализу оценок масс центральных черных дыр построенного списка радиогалактик. Оценки масс считались по оптическим данным в фильтре R и радиоданным на частоте 5 ГГц в предположении, что радиогалактики списка являются эллиптическими. Были изучены различные соотношения между этими двумя оценками. Одно из таких соотношений – “ $M_{opt}^{bh} - M_{rad}^{bh}$ ”. Оно выделяет область статистической применимости двух методов оценки масс сверхмассивных черных дыр и показывает уровень разброса значений, полученных этими методами. На диаграмме выделяются три области сгущения объектов, которые соответствуют: (1) сравнительно близким радиогалактикам в обзоре SDSS, для которых получают относительно близкие оценки массы ЧД, (2) далеким радиогалактикам и (3) отличным от эллиптических подклассом радиогалактикам. Обсуждаются несколько селекционных эффектов, которые приводят к расхождению значений оценок масс в разных методах их определения.

В разделе 1.4 собраны основные результаты и выводы этой главы.

Глава 2. Гигантские радиогалактики

Гигантские радиогалактики имеют размеры, сопоставимые с группой галактик или бóльшие. Поэтому их рассматривают как объекты, играющие важную роль в процессе формирования крупномасштабной структуры Вселенной [21]. При исследовании ГРГ вызывает интерес отражение фазовых характеристик (размеры, форма и ориентация) таких образований на картах микроволнового фона [17].

Исследованию нескольких подобных объектов на РАТАН–600, входящих в составленный каталог радиогалактик с $z > 0.3$, посвящена эта глава.

Исходная выборка содержала 120 объектов, из которых были выбраны галактики в соответствии с условиями наблюдений на РАТАН–600. Представ-

лены результаты наблюдений тринадцати ГРГ, которые проводились на Северном секторе PATAN-600 во второй декаде декабря 2008 г. и Южном секторе в первой декаде января 2010 г. При наблюдениях использовался комплекс радиометров сплошного спектра [22] для длин волн 2.7, 3.9, 6.25 и 13 см.

Получены плотности потоков наблюдаемых компонент ГРГ на длинах волн PATAN-600, с использованием данных каталогов NVSS (NRAO VLA Sky Survey) [23], WENSS [24] (Westerbork Northern Sky Survey) и GB6 (Green Bank) [25], построены спектры компонент и рассчитаны спектральные индексы в исследуемом частотном диапазоне.

В заключении обсуждается разнообразие свойств исследуемых ГРГ. Наблюдения на PATAN-600 позволили уточнить спектры компонент ГРГ и при экстраполяции радиоспектра оценить их поток в миллиметровом диапазоне длин волн. Значения плотностей потоков исследуемых компонент ГРГ лежат в этой части спектра на уровне выше 0.6 мЯн. При ожидаемом количестве объектов типа ГРГ в несколько сотен на полной сфере [17] их вклад в фоновое излучение, в принципе, может привести к байесу (сдвигу в распределении) при расчете уровня флуктуаций фона, не говоря о проблемах разделения сигнала.

Глава 3. Корреляционные свойства далеких радиогалактик и СМВ

Радиогалактики представляют серьезную проблему в исследовании реликтового излучения, когда приходится искать методы чистки микроволнового фона от внегалактических источников. Поэтому первостепенный интерес в области исследования фоновых излучений представляют методы выделения и удаления радиогалактик.

В разделе 3.2 исследуются свойства сигнала СМВ в площадках далеких

($z > 0.3$) радиогалактик. Обнаружено, что в целом распределение сигнала в площадках соответствует нормальному распределению. Причем в этом распределении доминируют малые величины флуктуаций, что привело к возрастанию амплитуды гистограммы в области нуля. Она оказалась выше, чем ожидалось из гауссовых искажений фона в моделях Λ CDM.

В разделе 3.3 представлен и апробирован метод корреляционного картографирования на сфере, который реализован в рамках пакета GLESP [26],[27]. Подход позволяет обнаружить корреляции на исследуемых площадках определенного углового размера для карт, пикселизованных с более высоким разрешением. Метод реализован в пиксельном параметрическом пространстве. Картирование корреляций состоит в присвоении пикселу с номером p результата корреляции внутри телесного угла Ξ_p , вычисляемой для двух карт, имеющих более высокое разрешение. В результате мы получаем новую карту, в которой величина каждого пиксела отражает уровень корреляции исследуемых карт в данной площадке.

Коэффициент корреляции анизотропии температуры СМВ и некоторого сигнала для каждого пиксела p ($p = 1, 2, \dots, N_0$, где N_0 — полное число пикселов на сфере), стягивающего телесный угол Ξ_p и вычисляемый для карт на сфере с исходным разрешением, определяемым ℓ_{max} , есть

$$K(\Xi_p | \ell_{max}) = \frac{\sum_{p_{ij} \in \Xi_p} (\Delta T(\theta_i, \phi_j) - \overline{\Delta T(\Xi_p)})(S(\theta_i, \phi_j) - \overline{S(\Xi_p)})}{\sigma_{\Delta T_p} \sigma_{S_p}}, \quad (1)$$

где $\Delta T(\theta_i, \phi_j)$ — величина анизотропии температуры СМВ в пикселе с координатами (θ_i, ϕ_j) для заданного разрешения пикселизации сферы, $S(\theta_i, \phi_j)$ — величина другого сигнала в той же площадке, $\overline{\Delta T(\Xi_p)}$ и $\overline{S(\Xi_p)}$ — средние значения в площадке Ξ_p , полученные по данным карт с более высоким разрешением, задаваемым ℓ_{max} , $\sigma_{\Delta T_p}$ и σ_{S_p} — соответствующие стандарты на этой площадке.

Возможности метода демонстрируются для данных WMAP (карты ILC и фоновые излучения (синхротронное, свободно-свободное и пыль)), обзора NVSS и модели RZF, каталогов гамма-всплесков ВерроSAX и BATSE.

Проверена гипотеза о существовании особых зон СМВ, которая не подтверждена. Статистика попаданий пятен СМВ и максимумов распределения в картах NVSS соответствует стандартной Λ CDM-космологии. Распределение корреляций говорит в пользу того, что "Холодное Пятно проявляющееся одновременно в СМВ и NVSS, может быть результатом случайного совпадения, и для его объяснения нет необходимости привлекать новую физику.

Строятся карты корреляций ILC и фоновых компонент для разных угловых масштабов. У распределений значений пикселей двух фоновых компонент (пыль и синхротрон) наблюдается сдвиг в сторону антикорреляций. Кроме сдвига наблюдается существенное искажение формы самого распределения. Для более подробного исследования полученного результата строится угловой спектр мощности карты корреляционных коэффициентов:

$$C(\ell) = \frac{1}{2\ell + 1} \left[|a_{\ell 0}|^2 + 2 \sum_{m=1}^{\ell} |a_{\ell m}|^2 \right], \quad (2)$$

где $a_{\ell m}$ – коэффициенты при сферических гармониках в гармоническом разложении сигнала на сфере. Спектр показывает значительное превышение мощности квадруполь над остальными гармониками, особенно для пылевой компоненты. Квадруполь оказывается чувствительным одновременно к двум системам координат: эклиптической и экваториальной.

Наличие осей квадруполь, соединяющих холодные и горячие пятна, мощности, многократно превышающие 1σ , говорят о высоком уровне негауссовости низких мультиполей сигнала WMAP. Важным моментом является положение этих пятен, которое совершенно не кажется случайным. Координаты минимумов холодных пятен квадруполь близки к координатам $(0^\circ, 0^\circ)$ и $(180^\circ, 0^\circ)$ как в эклиптической, так и в экваториальной системах координат,

а положение горячих пятен (полюса либо в эклиптической, либо в экваториальной системе) чувствительно к размеру выбранного корреляционного масштаба.

Также в этом разделе рассматривается еще одно приложение корреляционного метода – статистические корреляционные свойства распределения гамма-всплесков на небе по отношению к космическому микроволновому фону. Интерес представляет возможная связь распределения гамма-всплесков с крупномасштабной структурой [28].

Вначале проводится статистика сигнала СМВ в области гамма-всплесков. Измерялись значения пикселей в картах СМВ. Исследование свойств положений гамма-всплесков из области пика в распределении коротких всплесков ($t < 2$ сек) каталога BATSE по отношению к СМВ показало неожиданную чувствительность к околосемным системам координат. Чтобы это более подробно исследовать, были проведены различные корреляции между картой ИС и каталогами гамма-всплесков ВерроSAX и BATSE: корреляция данных BATSE и ВерроSAX и корреляция данных BATSE и СМВ для длинных ($t > 2$ сек) и коротких гамма-всплесков.

Анализ спектров мощностей карт корреляций показал некоторые особенности, которые формально выходят за уровень 2σ . Было проведено численное моделирование, которое показало, что вероятности обнаруженных особенностей чрезвычайно малы (не больше 6%). Обнаруженные корреляции оказались чувствительны к экваториальной системе координат и, скорее всего, связаны с систематическими эффектами.

В завершении главы суммируются и обсуждаются полученные результаты.

Заключение

В Заключении проводится небольшой обзор по каждой главе и формулируются результаты, выносимые на защиту.

Представленная работа показывает важность изучения радиогалактик. В результате проведенной работы был составлен каталог далеких радиогалактик, исследовано возможное влияние вклада таких объектов в микроволновое излучение и предложен метод корреляционного картографирования на сфере.

Благодарности

Автор глубоко благодарен своему научному руководителю, доктору физ.-мат. наук, Верховданову Олегу Васильевичу за предоставленную возможность работать вместе, поддержку, а также за постоянную и разностороннюю помощь в ходе подготовки диссертации.

Особые слова благодарности автор выражает Юрию Николаевичу Парийскому за внимание к работе и полезные дискуссии.

Хочется выразить признательность Сотниковой Ю.В. за помощь в проведении наблюдений на радиотелескопе РАТАН-600, а также Насоновой О.Г. за помощь в работе. Отдельную благодарность автор выражает Трушкину С. Н. и Карпову С. В. за полезные замечания, позволившие улучшить работу.

Искренние слова благодарности Верховдановой Наталии Викторовне за моральную поддержку на протяжении всей работы. Автор благодарен своему мужу Павлюченко Сергею Андреевичу за понимание и замечания при написании рукописи.

Работа была частично поддержана грантами РФФИ 09-02-00298, 09-02-92659-Ind и грантом “Ведущие научные школы России” (школа С. М. Хайкина).

Личный вклад автора

Автор равноправно участвовал во всех обсуждениях и постановках задачи и методов их решения. Личный вклад в совместных публикациях по теме диссертации:

1. В работах [1,2,4,10] – тестирование метода мозаичного картографирования и анализ карт с его помощью.
2. В работах [3,5-7] – селекция объектов по заданным критериям и построение каталога далеких радиогалактик, проведение статистического анализа данных.
3. В работе [8] – обработка и анализ данных, полученных на РАТАН-600.
4. В работе [11] – оценка светимости и масс центральных черных дыр.

Основные публикации по теме диссертации

Результаты диссертации опубликованы в 14 статьях в рецензируемых научных журналах:

1. Хабибуллина М.Л., Верходанов О.В., Парийский Ю.Н. 2008, Свойства одномерных сечений карт WMAP на склонении $\delta=41^\circ$, Астрофизический бюллетень **63**, №2, 101-108.
2. Верходанов О.В., Хабибуллина М.Л., Майорова Е.К., Парийский Ю.Н. 2008, Корреляционные свойства карт NVSS обзора и WMAP ILC, Астрофизический бюллетень **63**, №4, 389-396 (arXiv:0902.0281).
3. Хабибуллина М.Л., Верходанов О.В. 2009, Каталог радиогалактик с $z>0.3$. I: Построение выборки, Астрофизический бюллетень **64**, №2, 126-142 (arXiv:0911.3741).
4. Верходанов О.В., Хабибуллина М.Л., Майорова Е.К. 2009, Мозаичное картографирование корреляций фоновых излучений и распределений источников, Астрофизический бюллетень **64**, №3, 272-279.

5. Хабибуллина М.Л., Верходанов О.В. 2009, Каталог радиогалактик с $z > 0.3$. II: Фотометрические данные. Астрофизический бюллетень **64**, №3, 287-296 (arXiv:0911.3747).
6. Хабибуллина М.Л., Верходанов О.В. 2009, Каталог радиогалактик с $z > 0.3$. III: Размеры и плотности потока по данным NVSS, Астрофизический бюллетень **64**, №4, 357-365 (arXiv:0911.3752).
7. Верходанов О.В., Хабибуллина М.Л. 2010, О спектральном индексе далеких радиогалактик, Письма в АЖ **36**, №1, 9-15 (arXiv:1003.0577).
8. Хабибуллина М.Л., Верходанов О.В., Сингх М., Прия А., Верходанова Н.В., Нанди С. 2010, Радиоспектры гигантских радиогалактик по данным РАТАН-600, Астрономический журнал **87**, №7, 627-633 (arXiv:1009.4539).
9. Верходанов О.В., Соколов В.В., Хабибуллина М.Л., Карпов С.В. 2010, Загадки распределения GRBs на сфере, Астрофизический бюллетень **65**, №3, 252-263 (arXiv:1009.3720).
10. Верходанов О.В., Хабибуллина М.Л. 2010, Мультипольные доминанты в мозаичных картах корреляций данных WMAP5, Астрофизический бюллетень **65**, №4, 413-423.
11. Хабибуллина М.Л., Верходанов О.В. 2011, К вопросу о возможности оценки масс черных дыр далеких радиогалактик, Астрономический журнал **88**, №4, 333-341.

Список цитированной литературы

- [1] G. Hinshaw, J. L. Weiland, R. S. Hill, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **180**, 225 (2009), astro-ph/0803.0732.
- [2] D. P. Schneider, P. B. Hall, G. T. Richards, et al., *Astrophys. J.* **134**, 102 (2007).
- [3] E. Komatsu, J. Dunkley, M. R. Nolta, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **180**, 330 (2009), astro-ph/0803.0547.
- [4] Н. С. Соболева, Диссертация в форме науч. докл. на соиск. уч. степ. докт. физ.-мат. наук. Санкт-Петербург. СПб (1992).
- [5] K. C. Chambers, G. K. Miley and W. J. M. van Breugel, *Nature* **329**, 604 (1987).
- [6] О. В. Верходанов и Ю. Н. Парийский, *Радиогалактики и космология*, Физ.Мат.Лит., Москва (2009).
- [7] G. Miley and C. De Breuck, *Astron. Astrophys. Rev.* **15**, 67 (2008).
- [8] G. De Zotti, R. Ricci, D. Mesa, et al., *Astro. & Astrophys.* **431**, 893 (2005), astro-ph/0410709.
- [9] О. В. Верходанов и С. А. Трушкин, *Бюллетень САО* **50**, 115 (2000).
- [10] О. В. Верходанов, В. О. Чавушян, Р. Мухика и др., *Астрономический журнал* **80**, 140, (2003).
- [11] С. К. Балаян и О. В. Верходанов, *Астрофизика* **47**, 596, (2004).
- [12] С. А. Трушкин, *Бюллетень САО* **55**, 90 (2003).
- [13] О. В. Верходанов, А. И. Копылов, Ю. Н. Парийский и др., *Бюллетень САО* **48**, 41 (1999), astro-ph/9910559.
- [14] О. В. Верходанов, *Астрономический журнал* **71**, 3, 352 (1994).
- [15] О. В. Верходанов и Н. В. Верходанова, *Астрономический журнал* **76**, 483 (1999).
- [16] Ю. Н. Парийский, В. М. Госс, О. В. Верходанов и др., *Бюллетень*

CAO **48**, 5 (1999), astro-ph/9910383.

[17] O. V. Verkhodanov, M. L. Khabibullina, M. Singh, et al., в сборнике “*Practical Cosmology*”, международная конференция “Problems of Practical Cosmology”, Russian Geograph. Soc., St.Petersburg, V.II, 247 (2008).

[18] В. Л. Горохов и О. В. Верходанов, Письма в Астрономический журнал **20**, 776 (1994).

[19] М. Л. Хабибуллина, О. В. Верходанов и Ю. Н. Парийский, Астрофизический бюллетень, **63**, 101 (2008).

[20] Е. К. Майорова, Астрофизический бюллетень **63**, 59 (2008).

[21] M. Jamrozy, J. Machalski, K.-H. Mack, and U. Klein, *Astro & Astrophys.* **433**, 467 (2005).

[22] Н. А. Нижельский, А. Б. Берлин, А. М. Пилипенко и др., Тез. докл. Всерос. астрон. конф. ВАК-2001, С.Петербург, с.133 (2001).

[23] J. J. Condon, W. D. Cotton, E. W. Greisen et al., *Astrophys. J.* **115**, 1693 (1998).

[24] R. B. Rengelink, Y. Tang, A. G. de Bruyn, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **124**, 259 (1997).

[25] P. C. Gregory, W. K. Scott, K. Douglas, and J. J. Condon, *Astrophys. J. Suppl.* **103**, 427 (1996).

[26] A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov, et al., *Int. J. Mod. Phys. D.* **14**, 275 (2003), astro-ph/0305537.

[27] О. В. Верходанов, А. Г. Дорошкевич, П. Д. Насельский и др., Бюллетень CAO **58**, 40 (2005).

[28] L. L. R. Williams and N. Frey *Astrophys. J.* **583**, 594 (2003).

Бесплатно

М. Л. Хабибуллина

Исследование радиогалактик как космологических реперов.

Зак. №183с Уч.изд.лит. 2.0 Тираж 100

Российская Академия Наук Специальная астрофизическая обсерватория