
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ РОССИЙСКОЙ
АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи
УДК 524.7-77, 524.827

Соловьёв Дмитрий Игоревич

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

Специальность 01.03.02 – астрофизика и звёздная астрономия

Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук

Научный руководитель
доктор физико-математических наук
Верходанов Олег Васильевич

САО РАН, 2019

Содержание

Содержание	2
Список иллюстраций	4
Список таблиц	12
Введение	14
1 Поиск и отождествление гигантских радиогалактик	31
1.1 Введение	31
1.2 Процедура селекции кандидатов в ГРГ	32
1.3 Отождествление	33
1.3.1 Комментарии к отдельным источникам	41
2 Галактики с признаками слияния	54
2.1 Введение	54
2.2 Отождествление	56
2.2.1 Комментарии к источникам	57
2.3 Заключение по галактикам с признаками слияния	61
3 Сравнение свойств радиогалактик разных популяций по микроволновым данным миссии Planck	63
3.1 Описание метода	63
3.2 Выборки	65
3.2.1 Гигантские радиогалактики	65
3.2.2 Выборки сравнения	68
3.3 Средний популяционный микроволновой сигнал	70
3.4 Заключение	77
4 Модель галактик на сфере	79
4.1 Введение	79
4.2 Построение модели	80
4.2.1 Морфология радиоисточников	80
4.2.2 Плотность потока	85

4.3	Спектр мощности	88
4.4	Заключение по модели	89
5	Поиск кандидатов в объекты с эффектом Сюняева-Зельдовича в окрестности радиоисточников	91
5.1	Введение	91
5.2	Данные Planck	92
5.3	Построение алгоритма	94
5.3.1	Селекция объектов	94
5.3.2	Алгоритм селекции	95
5.4	Результаты	98
5.4.1	Популяция радиоисточников	98
5.4.2	Статистика отождествлений	100
5.5	Заключение	103
	Заключение	118

Список иллюстраций

1	План исследований, проводимых в рамках диссертационной работы.	17
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 [A8].	26
3	Блок-схема селекции кандидатов в объекты с эффектом Сюняева-Зельдовича в окрестности радиоисточников. Совместный результат диссертанта из работы [A9]	28
1.1	Изображения больших радиогалактик типа FR I, детектированных методом соответствия осей, по данным обзора NVSS. Совместный результат диссертанта из работы [A2]	39
1.3	Продолжение. Изображения больших радиогалактик типа FR I, детектированных методом соответствия осей, по данным обзора NVSS. Совместный результат диссертанта из работы [A2]	40
1.4	Непрерывные радиоспектры БРГ типа FR I по результатам отождествления в CATS. Совместный результат диссертанта из работы [A2]	41
1.5	В центре изображения источник J010725.4+322439 на карте ($30' \times 30'$) космической миссии Планк на частоте 100 ГГц. Совместный результат диссертанта из работы [A2]	42
1.6	Изображения больших радиогалактик типа FR II, детектированных методом соответствия осей, по данным обзора NVSS. Совместный результат диссертанта из работы [A2]	45
1.6	Продолжение. Изображения больших радиогалактик типа FR II, детектированных методом соответствия осей, по данным обзора NVSS. Совместный результат диссертанта из работы [A2]	46
1.6	Продолжение. Изображения больших радиогалактик типа FR II, детектированных методом соответствия осей, по данным обзора NVSS. Совместный результат диссертанта из работы [A2]	47

1.7	Непрерывные радиоспектры БРГ типа FR II по результатам отождествления в CATS. Совместный результат диссертанта из работы [A2]	48
1.7	Продолжение. Непрерывные радиоспектры БРГ типа FR II по результатам отождествления в БД CATS. Совместный результат диссертанта из работы [A2]	49
1.8	Кандидат на отождествление РГ J001748.5-222256 — галактика 2MASX J00174780-2223195. Изолинии построены по данным обзора NVSS на изображении DSS. Кандидат отмечен стрелкой. Размер изображения $6' \times 6'$. Совместный результат диссертанта из работы [A3]	49
1.9	В центре изображения минимум излучения на месте источника J071244.0-085019 на карте ($30' \times 30'$) космической миссии Планк на 100 ГГц. Совместный результат диссертанта из работы [A3]	50
1.10	Кандидат на отождествление РГ J080244.1-095757 — галактика 2MASX J08024016-0957504. Изолинии построены по данным обзора NVSS на изображении DSS. Кандидат отмечен стрелкой. Размер изображения $6' \times 6'$. Совместный результат диссертанта из работы [A3]	51
1.11	В центре изображения источник J142554.6-080401 на карте ($30' \times 30'$) космической миссии Планк на 100 ГГц. Совместный результат диссертанта из работы [A3]	52
1.12	В центре изображения минимум излучения на месте источника J191918.2+514208 на карте ($30' \times 30'$) космической миссии Планк на 100 ГГц. Совместный результат диссертанта из работы [A3]	53
1.13	Кандидат на отождествление РГ J202339.8+170350 — галактика 2MASX J20233698+1702409. Изолинии построены по данным обзора NVSS на изображении DSS. Кандидат отмечен стрелкой. Размер изображения $6' \times 6'$. Совместный результат диссертанта из работы [A3]	53
2.1	Непрерывные радиоспектры объектов по результатам отождествления в CATS. Шкала по осям в логарифмическом масштабе. Совместный результат диссертанта из работы [A4]	57
2.2	Структура радиогалактик с признаками взаимодействия. Изображения построены с использованием карт обзора NVSS на частоте 1.4 ГГц. Совместный результат диссертанта из работы [A4].	59
2.3	Область, центрированная на радиогалактику J005744.4+302156, на картах космической миссии Планк с источником. Наблюдательные данные на частоте 100 ГГц. Размер площадки — $30' \times 30'$. По оси абсцисс — прямое восхождение, по оси ординат — склонение. Положение радиогалактики отмечено кружком. Совместный результат диссертанта из работы [A4].	60

- 2.4 Область, центрированная на радиогалактику J010725.4+322439, на картах космической миссии Планк с источником. Слева: наблюдательные данные на частоте 100 ГГц. Справа: данные космического микроволнового фона. Размер площадки — $30' \times 30'$. По оси абсцисс — прямое восхождение, по оси ординат — склонение. Положение радиогалактики отмечено кружком. Совместный результат диссертанта из работы [A4]. 60
- 3.1 Зоны стэкинга размером $1^\circ \times 1^\circ$, построенные по данным карты CMB SMICA Planck 2.02. Слева направо сверху вниз изображения средних карт для популяций объектов: (1) ГРГ с угловыми размерами $\theta > 4'$ и линейными > 1 Мpc (89 шт.), (2) галактики типов gE и CD (25 шт.), (3) радиоисточники (RS) обзора WENSS со спектральными индексами $\alpha < -1.1$ (224 шт.), (4) WENSS RS с $-1.1 \leq \alpha < -0.75$ (661 шт.), (5) WENSS RS с $-0.75 \leq \alpha < -0.5$ (497 шт.), (6) WENSS RS с $-0.5 \leq \alpha < 0$ (238 шт.), (7) WENSS RS с $\alpha \geq 0$ (19 шт.), (8) далекие RG с красными смещениями $0.3 \leq z < 0.7$ (1797 шт.), (9) HZRG с $0.7 \leq z < 1.0$ (205 шт.), (10) HZRG с $1.0 \leq z < 1.5$ (149 шт.), (11) HZRG с $1.5 \leq z < 2.0$ (103 шт.), (12) HZRG с $2.0 \leq z < 2.5$ (77 шт.), (13) HZRG с $z \geq 2.5$ (81 шт.), (14) события BATSE длительностью $t < 2s$ (495 шт.), (15) BATSE, $t > 2s$ (1540 шт.), (16) ВерроSAX, $t < 2s$ (87 шт.), (17) ВерроSAX, $t > 2s$ (694 шт.). Исходные данные CMB приведены термодинамической температуре. Совместный результат диссертанта из работы [A7]. 71
- 3.2 Распределение энергии в спектре, представленной в термодинамической температуре $T_{\text{CMB},K}$ для $\nu < 500$ ГГц и $\text{Ян}\cdot\text{ср}^{-1}$ для $\nu > 500$ ГГц, по данным осреднения областей вокруг радиоисточников каталога WENSS из диапазона прямых восхождений $0^h \leq RA < 2^h$ на многочастотных картах наблюдений Planck. Пустыми кружками и толстой черной сплошной линией показаны измерения температуры микроволновых карт Planck в направлении на ГРГ. Заполненные ромбики и штриховая линия соответствуют областям вокруг радиоисточников с инвертированными спектрами ($\alpha > 0$). Заполненными кружками и тонкой сплошной линией отмечены данные по осреднению полей вокруг объектов с $-1.1 \leq \alpha < -0.75$. Пустые ромбики и пунктирная линия отмечают данные для источников с укльтракрутыми спектрами ($\alpha < -1.1$). Между последними двумя распределениями лежат спектры для средник объектов из популяций с $-0.75 \leq \alpha < -0.5$ и $-0.5 \leq \alpha < 0$. Совместный результат диссертанта из работы [A7]. 73

- 3.3 Распределение энергии в спектре, представленной в термодинамической температуре, по данным осреднения областей вокруг гигантских эллиптических галактик типов gE и cD. Показано пустыми квадратами и пунктирной линией. Пустыми кружками и толстой черной сплошной линией показаны измерения температуры микроволновых карт Planck в направлении на ГРГ. Совместный результат диссертанта из работы [A7]. 74
- 3.4 Распределение энергии в спектре, представленной в термодинамической температуре $T_{\text{СМВ,К}}$ для $\nu < 500$ ГГц и $\text{Ян}\cdot\text{ср}^{-1}$ для $\nu > 500$ ГГц, по данным осреднения областей вокруг далеких радиогалактик на многочастотных картах наблюдений Planck. Пустыми кружками и толстой черной сплошной линией показаны измерения температуры микроволновых карт Planck в направлении на ГРГ. Слева распределение энергии в спектре среднего объекта по данным карт Planck в области далеких радиогалактик с удалением отрицательного среднего сигнала и включением данных по высоким частотам (545 и 857 ГГц). Справа распределение энергии в спектре среднего объекта по данным карт Planck в области далеких радиогалактик с учетом отрицательного среднего сигнала и исключением высоких частот. Шкала по оси абсцисс линейная. Пустыми ромбиками и пунктирной линией отмечены усредненные данные площадок вокруг радиогалактик с красными смещениями из диапазона $0.3 \leq z < 0.7$. Заштрихованные ромбики и штриховая линия соответствуют областям вокруг радиогалактик с $0.7 \leq z < 1.0$. Звездочками и длинной тонкой штриховой линией показаны данные из диапазона $1.0 \leq z < 1.5$. Заштрихованным квадратом отмечен отрицательный сигнал в области 70 ГГц (правый рисунок) для данных с $1.5 \leq z < 2.0$. Заштрихованными верхними треугольниками и длинной штриховой линией показаны данные по радиогалактикам из диапазона $2.0 \leq z < 2.5$, а нижними треугольниками и тонкой сплошной линией - из интервала $2.5 \leq z$. Совместный результат диссертанта из работы [A7]. 75
- 3.5 Распределение энергии в спектре, представленной в термодинамической температуре $T_{\text{СМВ,К}}$, по данным осреднения областей вокруг гамма-всплесков каталогов BATSE и ВерроSAX на многочастотных картах наблюдений Planck. Пустыми кружками и толстой черной сплошной линией показаны измерения температуры микроволновых карт Planck в направлении на ГРГ. Пустыми ромбиками и пунктирной линией отмечены данные по осреднению полей вокруг коротких событий BATSE. Заштрихованные ромбики и штриховая линия соответствуют областям вокруг длинных событий BATSE. Заштрихованные кружки и тонкая черная линия показывают данные коротких событий ВерроSAX, а заштрихованный ромбик — длинных событий ВерроSAX. Совместный результат диссертанта из работы [A7]. 76

4.1	Дифференциальные распределения большой оси для источников из каталога WENSS для одиночных источников. Сплошной линией обозначены данные WENSS, штрихованная соответствует модельным данным. Совместный результат диссертанта из работы [A8].	82
4.2	Дифференциальные распределения большой оси для источников из каталога WENSS для двойных источников. Сплошной линией обозначены данные WENSS, штрихованная соответствует модельным данным. Совместный результат диссертанта из работы [A8].	82
4.3	Дифференциальные распределения малой оси для источников из каталога WENSS для одиночных источников. Сплошной линией обозначены данные WENSS, штрихованная соответствует модельным данным. Совместный результат диссертанта из работы [A8].	83
4.4	Дифференциальные распределения малой оси для источников из каталога WENSS для двойных источников. Сплошной линией обозначены данные WENSS, штрихованная соответствует модельным данным. Совместный результат диссертанта из работы [A8].	83
4.5	Дифференциальные распределения отношения больших осей к малым для одиночных (сплошная линия) и двойных (штрихованная линия) источников из каталога WENSS. Совместный результат диссертанта из работы [A8]. . .	84
4.6	Дифференциальные распределения позиционного угла (параметр <i>Position_Angle</i>) для источников из каталога WENSS для одиночных (single, сплошная линия) и двойных (double, штрихованная линия) источников, для которых он определен. На лицо явная неоднородность. Совместный результат диссертанта из работы [A8].	84
4.7	Разность позиционных углов компонент, составляющих двойной источник WENSS, выраженная в градусах. Явно выделены величины около нуля, -180 и +180 градусов, соответствующие небольшим отклонениям от общего направления. Совместный результат диссертанта из работы [A8].	85
4.8	Дифференциальное распределение расстояния между компонентами двойного источника WENSS. Совместный результат диссертанта из работы [A8].	85
4.9	Дифференциальное распределение отношения больших осей компонент двойного источника из WENSS. Совместный результат диссертанта из работы [A8].	86
4.10	Дифференциальное распределение отношения малых осей компонент двойного источника WENSS. Совместный результат диссертанта из работы [A8].	86
4.11	Дифференциальное распределение отношения расстояния между центрами компонент к полусумме их больших осей. Это соотношение демонстрирует, насколько удалены друг от друга компоненты в масштабах собственного усредненного размера. Совместный результат диссертанта из работы [A8]. .	87

4.12	Дифференциальное распределение параметра малой оси одиночного источника из WENSS (сплошная линия) и модельного (штрихованная), если генерировать последний без учета его собственного распределения, а лишь восстанавливать из отношения к большой оси. Совместный результат диссертанта из работы [A8].	87
4.13	Нормированная кривая подсчетов радиоисточников на частоте 1.4 ГГц. Сплошная кривая представляет наилучшую модельную зависимость с $\Omega_0 = 1$ (плоская Вселенная) из работы [121]. Штриховые линии показывают вклад радиоисточников, имеющих функцию светимости спиральных и эллиптических галактик. По абсциссе дана плотность потока в Янских, по ординате — логарифм дифференциального подсчета источников, умноженного на $S^{2.5}$, ($\text{sr}^{-1} \text{Ян}^{1.5}$). Подсчеты источников S проводились в пределах $30 \mu\text{Ян} \leq S < 60 \text{Ян}$ на частоте 1.4 ГГц Рис. из работы Кондона [121].	88
4.14	Дифференциальное распределение потока, оси абсцисс и ординат имеют логарифмический масштаб. Сплошной линией обозначены данные из [121], штрихованной модельные. Ввиду ограниченно малого числа источников в модели, наблюдается полное отсутствие части распределения, соответствующего наиболее редким. Совместный результат диссертанта из работы [A8].	89
4.15	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 [A8].	90
5.1	Карта реликтового излучения SMICA Planck в галактических координатах. Черным цветом показано заполнение области полного обзора WENSS (24 часа по прямому восхождению) радиоисточниками. Совместный результат диссертанта из работы [A9].	96
5.2	Карта реликтового излучения SMICA Planck в галактических координатах. Черным цветом показано заполнение радиоисточниками области обзора WENSS (границы области по прямому восхождению: $0^h < \alpha < 2^h$). Совместный результат диссертанта из работы [A9].	96
5.3	Карта CMB SMICA Planck [184]. Слева: карта CMB с полным набором сферических гармоник ($2 \leq \ell \leq 2500$). Справа: карта CMB с $20 < \ell \leq 2500$. Совместный результат диссертанта из работы [A9].	97

5.4	Блок-схема селекции кандидатов в объекты с эффектом Сюняева-Зельдовича в окрестности радиоисточников. Совместный результат диссертанта из работы [A9].	97
5.5	Нормированное распределение спектральных индексов популяции радиоисточников WENSS с СЗ-эффектом из диапазона R.A. $0^h \leq \alpha < 2^h$ на частотах 326 МГц (сплошная линия), 1.4 (штрих-пунктирная линия) и 4.85 ГГц (штриховая линия). Совместный результат диссертанта из работы [A9].	99
5.6	Диаграмма “спектральный индекс $\gamma_{1.4\text{ GHz}}$ — вариация СМВ $\delta T_{\ell \in [21; 2500]}$ ” для радиоисточников исследуемой подвыборки. Совместный результат диссертанта из работы [A9].	99
5.7	Распределение уровня флуктуации СМВ в направлении на радиоисточники исследуемой подвыборки. Использована карта СМВ SMICA Planck с мультиполями $20 < \ell \leq 2500$. Пунктирными линиями показаны распределения $\pm 1\sigma$ и $\pm 3\sigma$ -уровней флуктуаций в стандартной Λ CDM-космологической модели по данным 200 реализаций случайной гауссовой карты СМВ. Совместный результат диссертанта из работы [A9].	100
5.8	Изображения области размером $30' \times 30'$ вокруг радиоисточника WNB 0008.7+5121 из каталога WENSS на картах космической миссии Planck соответственно справа налево сверху вниз на частотах 30, 44, 70, 100, 143, 217, 353, 545, 857 ГГц, а также (последняя картинка) — на карте реликтового излучения. Объект отождествляется со списком скоплений галактик с эффектом Сюняева-Зельдовича из соответствующего каталога миссии Planck. Совместный результат диссертанта из работы [A9].	102
5.9	Изображения области размером $30' \times 30'$ вокруг радиоисточника WNB 0119.4+4418 из каталога WENSS на картах космической миссии Planck соответственно справа налево сверху вниз на частотах 30, 44, 70, 100, 143, 217, 353, 545, 857 ГГц, а также (последняя картинка) — на карте реликтового излучения. Объект отождествляется со списком скоплений галактик с эффектом Сюняева-Зельдовича из соответствующего каталога миссии Planck. Совместный результат диссертанта из работы [A9].	103
5.10	Изображения области размером $30' \times 30'$ вокруг радиоисточника WNB 0016.5+4628 из каталога WENSS на картах космической миссии Planck соответственно справа налево сверху вниз на частотах 30, 44, 70, 100, 143, 217, 353, 545, 857 ГГц, а также (последняя картинка) — на карте реликтового излучения. Новый объект — кандидат в скопление с эффектом Сюняева-Зельдовича. Совместный результат диссертанта из работы [A9].	104

5.11	Изображения области размером $30' \times 30'$ вокруг радиоисточника WNB 0019.3+3120 из каталога WENSS на картах космической миссии Planck соответственно справа налево сверху вниз на частотах 30, 44, 70, 100, 143, 217, 353, 545, 857 ГГц, а также (последняя картинка) - на карте реликтового излучения. Новый объект — кандидат в скопление с эффектом Сюняева-Зельдовича. Совместный результат диссертанта из работы [A9].	105
5.12	Изображения области размером $30' \times 30'$ вокруг радиоисточника WNB 0021.6+5627 из каталога WENSS на картах космической миссии Planck соответственно справа налево сверху вниз на частотах 30, 44, 70, 100, 143, 217, 353, 545, 857 ГГц, а также (последняя картинка) - на карте реликтового излучения. Радиоисточник наблюдается на всех картах. Совместный результат диссертанта из работы [A9].	106
5.13	Изображения области размером $30' \times 30'$ вокруг радиоисточника WNB 0023.6+4723 из каталога WENSS на картах космической миссии Planck соответственно справа налево сверху вниз на частотах 30, 44, 70, 100, 143, 217, 353, 545, 857 ГГц, а также (последняя картинка) - на карте реликтового излучения. Радиоисточник наблюдается на всех картах. Совместный результат диссертанта из работы [A9].	117

Список таблиц

1.1	ГРГ типа FRI, детектированных методом сопоставления осей компонентов. Совместный результат диссертанта из работы [A2]	34
1.2	БРГ типа FRI, детектированных методом сопоставления осей компонентов. Совместный результат диссертанта из работы [A2]	36
2.1	Радиогалактики с признаками слияния из списка кандидатов в ГРГ, детектированных методом сопоставления осей компонентов. В столбцах таблицы — имена источников в формате IAU, включающем координаты объекта, тип радиоструктуры по морфологическим признакам взаимодействия: S, X или P (пара), и по классификации Фанарофф-Райли, плотность потока в мЯн, угловой и линейный (если известно красное смещение z) размеры объекта, наличие отождествления: в рентгеновском диапазоне (X), ИК (I) и оптическом (O), z , аппроксимационная кривая радиоспектра. Совместный результат диссертанта из работы [A4].	58
3.1	Список гигантских радиогалактик, используемых в осреднении процедурой stacking . Значения в скобках в столбце красных смещений — фотометрические оценки из работы [20].	65
3.2	Параметры выборок, используемых в исследовании.	70
5.1	Распределение объектов по интервалам прямого восхождения (1-ый столбец): $00 : 00 \leq \alpha < 00 : 30$, $00 : 30 \leq \alpha < 01 : 00$, $01 : 00 \leq \alpha < 01 : 30$ и $01 : 30 \leq \alpha < 02 : 00$. Во втором столбце приведено количество радиоисточников в соответствующем интервале прямых восхождений каталога WENSS. В третьем — число объектов, отобранных по критерию наличия отрицательных пиков на частотах 100 и 143 ГГц и положительного пика на частоте 353 ГГц, в четвертом столбце приведены данные отбора наиболее ярких (контрастных) примеров объектов с эффектом Сюняева-Зельдовича. В скобках указано процентное содержание от числа объектов в исходном каталоге. Совместный результат диссертанта из работы [A9].	101

5.2	Список отобранных источников с наличием эффекта Сюняева-Зельдовича из каталога WENSS в диапазоне прямых восхождений $0^h \leq \alpha < 2^h$ на эпоху каталога WENSS (1950.0). В столбцах таблицы приведены имя радиоисточника из каталога WENSS (индекс 's' указывает на наличие отождествления в [201], индекс 'p' — в [200]), экваториальные координаты на эпоху 2000.0, величину анизотропии температуры на карте CMB SMICA ($20 < \ell \leq 2500$) и значение спектрального индекса на частоте 1.4 ГГц. Совместный результат диссертанта из работы [A9].	106
-----	--	-----

Введение

Актуальность темы

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 [75] и Planck ЕКА [77, 78], 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 [18], влияя также и на карту реликтового фона (далее СМВ - Cosmic Microwave Background) [120]. 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) [120] 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 кроссождествления 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 [10], мы искали на небе сонаправленные протяженные структуры, соответствующие радиокомпонентам искомым объектам. В качестве исходного обзора неба был выбран NVSS [31]. 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 [29]. Метод был успешно применён, в результате чего список гигантских радиогалактик был расширен на 16 объектов [30], 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 [131] приводится каталог уже из 349 объектов данного типа. Дополнительным результатом явилось обнаружение среди ГРГ радиогалактик с признаками слияния [226]. Метод нашёл применение в работах других авторов [132].

Во-вторых, мы хотели проверить, как ГРГ могут проявлять себя в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне. Этот интерес вызван предполагаемым эффектом Сюняева-Зельдовича [80], создаваемым протяженными облаками плазмы, которые формируются радиоисточником. Предсказывается, что этот эффект должен быть существенен для гигантских радиогалактик ввиду их колоссальных линейных размеров [120]. Проверка этого предположения осуществлялась на подвыборке ГРГ, ограниченных снизу также угловыми размерами от 4 минут дуги [194].

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 [194]. 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 [203]. Морфология моделируемых объектов базируется на статистических распределениях наблюдаемых параметров протяженных радиоисточников из обзора WENSS [49]; статистика по потоку основана на методе подсчета радиоисточников из работы [121], впоследствии пересчитанная в интересующий нас миллиметровый диапазон на основе наших работ по исследованию радиоисточников в миллиметровом диапазоне [99, 100, 101]. 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 [227]. 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 ACT (Atacama Cosmology Telescope).

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

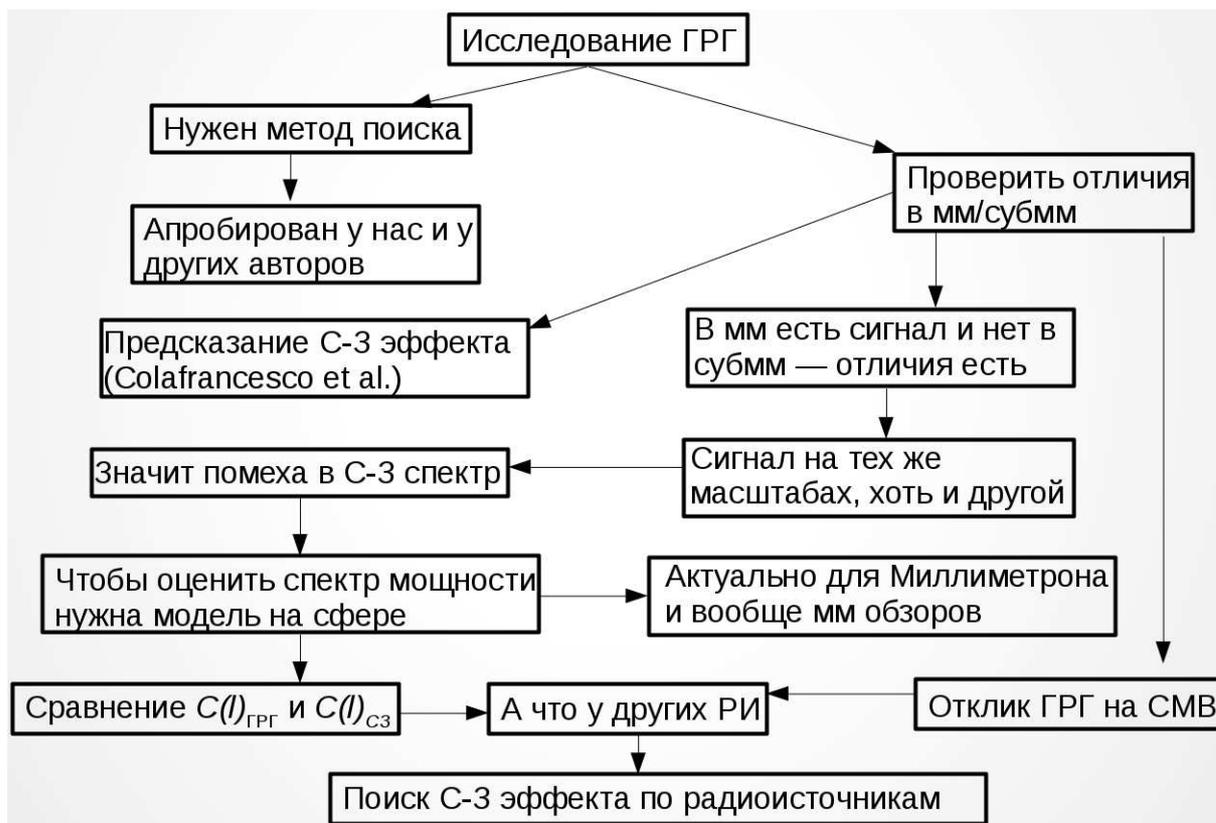


Рис. 1: План исследований, проводимых в рамках диссертационной работы.

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 [10]. Результаты работы метода, а также его описание, представлены в статье [29].
- 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 [30].
- Новые данные о ГРГ в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах по наблюдательным архивам Planck [122].
- 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 [203].
- 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 радиисточников 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.

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 [120]. 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 [10], 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) [31]. 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 III 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 [32, 33]). 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 [A1, A2, A3].

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 [36], а для ра-

диоотождествления – база данных CATS [32, 33]. 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) заметен 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 [A4].

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 [144, 145, 146, 147]. 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 [29, 30, 160, 206, 207, 117, 118, 119, 224, 176, 177, 208, 209, 210, 211, 212, 215, 217]. 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 [49], отобранных в диапазоне прямых восхождений $0^h \leq R.A. < 2^h$, которые уже исследовались ранее в микроволновом диапазоне [205]. Вторая выборка сравнения представляет собой список далёких ($z > 0.3$) радиогалактик и описана в работах [106, 107, 108]; данная выборка также уже использовалась в исследованиях данных микроволнового фона [161]. Третья выборка сравнения состоит из гигантских эллиптических галактик из списка скоплений [156], которые уже использовались ранее как дополнительные при исследовании радиогалактик [171]. Для сравнительного анализа также были использованы объекты из списков GRB космических обсерваторий BATSE [157] и ВерроSAX [158], отклик CMB и

результаты стэкинга для которых исследовались в работах [172, 173].

В разделе **Средний популяционный микроволновый сигнал** описывается процедура стекинга. Мы использовали многочастотные карты архива космической миссии Planck [78], а также карту CMB SMICA, построенную методом разделения компонент многочастотного сигнала [174]. Для обработки использовались пакеты GLESP [66] и SExtractor [103]. 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. [120]

Полученные в Главе 3 совместные результаты диссертанта опубликованы в работе [A7].

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 [75, 78]. Существенным искажающим фактором при восстановлении распределения CMB на высоких гармониках ($\ell > 2000$) является вклад в общую наблюдаемую картину протяженных радиоисточников [63]. 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 [66]

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

- распределение радиоисточников по спектральным плотностям потоков: кривая $\log N - \log S'$ [121];
- распределение протяженных источников по размерам, морфологии и позиционным углам на основе каталогизированных протяженных источников обзора WENSS [49];

- распределения по спектральным индексам для гигантских радиогалактик по данным РАТАН-600 и других радиотелескопов [106, 107, 108], 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 [99, 100, 101, 122, 123].

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) [49]. 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 [11, 12].

Протяженные источники представлялись в модели в виде либо двухкомпонентного объекта, соответствующего морфологическому типу FR II [10], 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 [121]. Моделирование параметра плотности потока проводилось в логарифмических бинах. Для пересчета плотности потока с низких частот в микроволновом диапазоне использовалось линейное приближение аппроксимации континуальных радиоспектров галактик со спектральным индексом $\alpha = -0.77$ ($S \sim \nu^\alpha$), полученных по данным радионаблюдений и отождествлений [108, 29, 30].

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

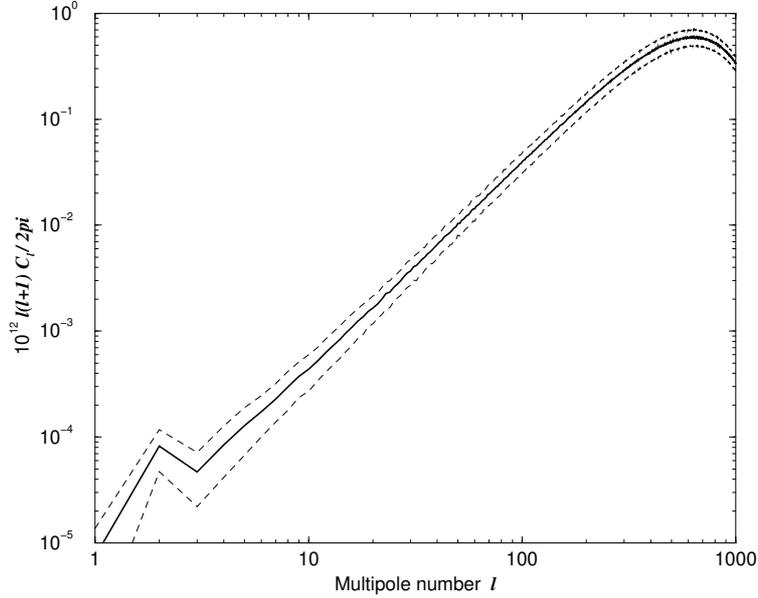


Рис. 2: Угловой спектр мощности $D_\ell = \ell(\ell+1)C_\ell/2\pi$ сглаженной до $10'$ карты моделированного микроволнового излучения на длине волны 3 мм от протяженных радиоисточников с угловым размером $\theta > 4'$. Сплошной линией показан средний спектр, рассчитанный по 200 случайным реализациям положений и форм протяженных радиоисточников. Пунктирными линиями отмечены границы разброса на уровне $\pm 1\sigma$ от среднего. Совместный результат диссертанта из работы [A8].

В разделе **Заключение** подводится 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 ($z \sim 6$) [133] и расширения ее с помощью новых моделей распределения источников [134, 135], разрабатываемых для космического эксперимента “Миллиметрон” [136].

Полученные в Главе 4 совместные результаты опубликованы в работе [A8].

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 [181].

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 радиоисточников 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 радиоисточников низкочастотного каталога WENSS [49] 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 [185]).
2. Выделение потенциальных источников с помощью стандартной программы поиска ‘SExtractor’ [103] 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 [197], 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 [174].

Графически алгоритм представлен на блок-схеме 3

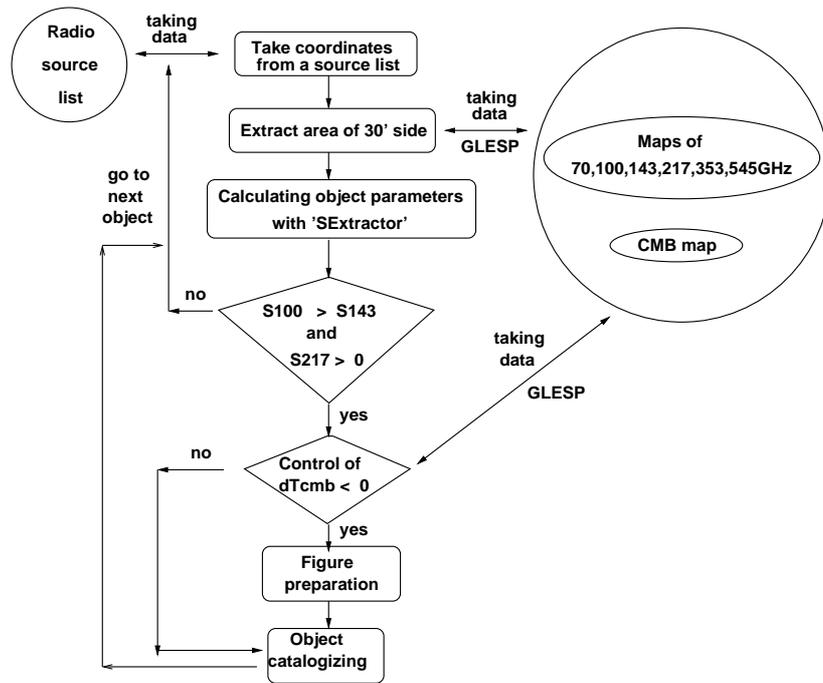


Рис. 3: Блок-схема селекции кандидатов в объекты с эффектом Сюняева-Зельдовича в окрестности радиоисточников. Совместный результат диссертанта из работы [A9]

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 радиоиспектра, 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 радиисточников часто наблюдается родительский объект, излучение от которого остается на карте СМВ, полученной в результате разделения компонент протяженного фонового сигнала. Несмотря на множественные обнаружения подобных радиисточников 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. Радиисточники 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 радиисточникам также позволит искать похожие объекты с большими красными смещениями ($z > 1$), которые не видны в [202] в силу селекционных эффектов.

Описанный в Главе 5 метод опубликован как совместный результат диссертанта в работе [A9].

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 Планк. *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).

Глава 1

Поиск и отождествление гигантских радиогалактик

1.1 Введение

В последнее десятилетие особое внимание привлекают исследования малочисленных популяций небесных объектов. Этот интерес связан с появлением новых наблюдательных данных обзоров неба с хорошей чувствительностью и полнотой в разных частотных диапазонах. Среди изучаемых объектов выделяются гигантские радиогалактики (ГРГ) — одни из самых больших объектов во Вселенной. Их размеры в радиодиапазоне составляют порядка или больше 1 Мпк и сравнимы с размером скоплений галактик. На сегодняшний день известно порядка 400 гигантских радиогалактик [131]. Как правило, ГРГ принадлежат к морфологическому типу FR II [10] и отождествляются в оптике с гигантскими эллиптическими галактиками и квазарами.

ГРГ значительно менее распространены, чем обычные радиогалактики, что осложняет их статистическое исследование. Несколько групп [11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21] занимаются их исследованием. Так, Ямрози и др. [18] отметили, что, поскольку размеры ГРГ сравнимы с размерами групп галактик, существование ГРГ может оказывать значительное влияние на окружающую среду. Поэтому, их рассматривают как объекты, играющие важную роль в формировании крупномасштабной структуры Вселенной.

Единого мнения о механизме образования ГРГ не существует. Так, существует теория, согласно которой столь большие размеры ГРГ могут быть объяснены эффектом ориентации в пространстве таким образом, при котором достигается максимальная проекция перпендикулярно лучу зрения наблюдателя. Впрочем, данные наблюдений ГРГ на телескопе в Эффельсберге не подтверждают эту гипотезу [12]. Группа [12] объясняет возникновение ГРГ в результате эволюции излучения в окружающей среде от наиболее старых источников в группе радиогалактик, имеющих сравнительно мощные ядра. Также, в работе [22] было показано, что размер гигантского радиоисточника может определяться наличием

группы долгоживущих радиогромких ядер, которые со временем эволюционируют в ГРГ.

Дополнительной задачей является исследование вклада излучения ГРГ в микроволновый сигнал, который может проявляться и как слабый сигнал от протяженных компонент радиогалактик на масштабах $\lesssim 10^\circ$ [23, 24, 25, 26], и как искажение фона в области ГРГ в результате эффекта Сюняева-Зельдовича [120]. Такой добавочный сигнал приводит к искажению спектра мощности на угловых масштабах 5–10 минут, но не учитывается в стандартных моделях, использующих подсчеты источников.

Одна из проблем, связанных с изучением ГРГ как отдельной популяции объектов, — увеличение их выборки. Для решения этой задачи использовались различные подходы: селекция по угловому размеру ярких радиоисточников на низких частотах [23], селекция ярких источников с меньшей угловой протяженностью по данным NVSS [27], по частотному изменению спектрального индекса с учетом размера диаграммы направленности антенны [28].

Предложен алгоритм поиска слабых радиогалактик с большими угловыми размерами [29, 30] — кандидатов в ГРГ, в основе которого лежит анализ структуры слабых протяженных радиоисточников обзора NVSS [31]. С применением предложенного алгоритма были отобраны 61 кандидат в гигантские радиогалактики, из которых 35 имеют четко выраженный морфологический тип FR II, 26 радиоисточников — тип FR I. Часть радиоисточников отождествляется с известными радиогалактиками (не классифицированными ранее как ГРГ), пять объектов, по-видимому, являются H II областями нашей Галактики, и часть — неисследованные радиоисточники.

1.2 Процедура селекции кандидатов в ГРГ

Для первоначального поиска ГРГ был использован каталог обзора NVSS (NRAO VLA Sky Surveys) [31], покрывающий 82% небесной сферы (все небо севернее -40° по склонению) и при этом имеющий достаточно высокое угловое разрешение. Каталог обзора NVSS содержит около 1.81 миллиона дискретных объектов на частоте 1.4 ГГц. Предел спектральной плотности потока на разрешимый дискретный источник в NVSS составляет 2.5 мЯн. Для объектов с поверхностной яркостью >15 мЯн точность разрешения оценивается сверху $1''$. Кандидаты в ГРГ, отобранные в наш список, имеют большую спектральную плотность потока.

В основе отбора кандидатов в протяженные гигантские источники предполагалось, что они, по крайней мере, двухкомпонентные объекты, чьи протяженные радиокомпоненты разрешаются и классифицируются в каталоге NVSS как отдельные независимые источники. При анализе каталога использовались процедуры базы данных CATS [32, 33].

Предлагаемый алгоритм поиска двойных источников использует четыре параметра:

- угловое расстояние между центрами источников d ,

- размер большой оси источника a в каталоге NVSS,
- угол ϕ между направлением больших осей проверяемой пары объектов,
- интегральная плотность потока S_i источника.

Процедура отбора позволяет выбрать из каталога объекты, у которых существуют вытянутые вдоль одной линии протяженные структуры. Значения параметров алгоритма задавались в следующих границах: $4' \leq d \leq 6'$, где нижний предел выбран как минимальный масштаб, на котором доступно сравнение наших данных с высшими мультиполями карты реликтового излучения миссии Planck, а верхний предел — по характерному расстоянию между протяженными компонентами при среднем количестве подобных объектов $\sim 1000 \div 1500$, оцененному по поверхностной плотности уже каталогизированных источников [23]. Кроме того, примерно со значений $d \sim 6'$ начинается стандартный квадратичный рост числа объектов в площадке, что может привести к путанице и трудноучитываемым селекционным эффектам в автоматической процедуре. Отметим, что из-за сравнительно высокого разрешения обзора NVSS в нем, как правило, отсутствуют объекты больше $3'$, в результате чего протяженные радиокомпоненты разрешаются на несколько источников, что затрудняет автоматическое распознавание многокомпонентных объектов и требует дополнительного визуального контроля.

Параметр a , определяющий размер большой оси источника, каталогизированного в NVSS, устанавливался на уровне $a > 1'$ для удаления из списка малых объектов хотя и подходящей ориентации, но являющихся лишь результатом лучшего разрешения протяженного источника. Верхний предел по интегральной плотности потока хотя бы для одной из компонент установлен на уровне $S_i < 100$ мЯн. Угол между большими осями источников — кандидатов в ГРГ выбирался с условием $\phi \leq 10^\circ$. Для анализа использовались источники с измеренными в NVSS размерами большой и малой осей и позиционным углом. В предварительный список заносились объекты (1) с $\phi \leq 10^\circ$ и/или (2) при выполнении условия, что пересечение продолжения прямых, на которых лежат большие полуоси анализируемых объектов исследуемой пары, расположено на расстоянии от источников, не превосходящим расстояния между объектами. Подобная процедура позволяет выделить различные морфологически связанные объекты, способные исказить результат разделения компонент микроволнового фона на исследуемых угловых масштабах. Отобранные объекты подвергались визуальному контролю с целью удаления ошибочных срабатываний алгоритма. Для этого использовалась внутренняя процедура запроса изображений NVSS 'nvsscat' системы FADPS [34].

1.3 Отождествление

В качестве базы данных по инфракрасным объектам был использован обзор 2MASS [36, 37] (полоса K). В оптическом диапазоне в качестве основного каталога использовался DSS.

При радиотождествлении мы использовали базу данных CATS [32, 33]. Для отдельных радиогалактик приведены также отождествления из первых радиоастрономических каталогов: 3С, 4С и Паркс (PKS), если таковые были обнаружены. При расчете спектральных индексов использовались результаты кросс-идентификации в базе данных CATS с окном отождествления $180'' \times 180''$. Для удаления случайных радиообъектов поля в заданном боксе мы использовали методику анализа данных, подобную описанной в [39, 40]. Суть метода состоит в применении совместного анализа данных в координатном и спектральном пространствах для выделения вероятных отождествлений конкретных радиоисточников на различных радиочастотах. Для этих целей используется программа 'spg' [41] системы обработки континуальных радиоспектров на РАТАН-600. При описании спектров $S(\nu)$ для дальнейшего вычисления спектральных индексов мы применили параметризацию $S(\nu)$ формулой $\lg S(\nu) = A + Bx + Cf(x)$, 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 . Результат отождествления и аппроксимации спектров для объектов типа FR I и FR II приведены в Таблицах 1.1 и 1.2 соответственно. В столбцах таблиц приведены: 1) имя в стандарте МАС, включающее координаты источника и координаты компонент; 2) морфологический тип; 3) значение спектральной плотности потока в мЯн на частоте 1.4 ГГц; 3) угловой размер в мин дуги; 4) размер объекта; 5) наличие отождествления в ИК диапазоне (I), оптическом (O) и рентгеновском (X) диапазонах; 6) аппроксимационная зависимость непрерывного спектра для интегральной плотности потока. Среди основных радиокаталогов БД CATS, используемых при построении спектров ГРГ, отметим списки из работ [31, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59].

Таблица 1.1: ГРГ типа FR I, детектированных методом сопоставления осей компонент. Совместный результат диссертанта из работы [A2]

Имя	Тип	Пл.потока, мЯн (1.4 ГГц)	Разм., '	XIO	Спектр
1	2	3	4	5	6
J005744.4+302156	FR I	586.8	8.4	XIO	$3.155 - 1.296x + 0.120x^2$
J010725.4+322439	FR I	915.5	11.1	XIO	$2.687 - 0.640x$
J011306.9-172028	FR I	183.4	6.9	IO	$1.709 - 0.753x$
J011303.7-172141		92.0			
J011313.9-171806		91.4			
J022033.5+365943	FR I	251.2	12.0	IO	$1.874 - 0.620x$
J022023.0+365940		102.1			
J022044.0+365945		149.1			
J065122.5+193713	FR I	244.7	7.7	IO	$-2.581 + 2.612x - 0.562x^2$

1	2	3	4	5	6
J065114.6+193615 J065130.5+193811		71.3 173.4			
J073331.1+574133 J073321.6+574222 J073340.5+574043	FR I	224.5 124.3 100.2	6.4	IO	$1.902 - 0.793x$
J083533.9-015100 J083534.0-015101 J083525.3-015025 J083542.6-015135	FR I	925.5 307.4 307.5 310.6	8.3	IO	$0.967 - 0.001x - 0.041e^x$
J084507.2-334711 J084503.3-334434 J084511.2-334948	FR I	661.5 101.3 560.2	35.5	IO	$0.919 + 0.001x - 0.024e^x$
J122045.0+055204 J122033.9+055145 J122044.4+055206 J122055.3+055235	FR I	432 168.6 171.9 91.5	8.1	–	
J124159.1+323217 J124149.9+323203 J124149.9+323203	FR I	612.5 163.9 448.6	12.8	IOX	$-0.535 + 1.143x - 0.296x^2$
J125310.7-103115	FR I	240.4	8.9	XIO	$0.855 - 0.036e^x$
J132345.8+313402 J132336.9+313445 J132354.6+313303	FR I	358.2 185.6 172.6	11.8	IO	$2.210 - 0.676x$
J140955.9+173243 J140946.8+173236 J141005.0+173250	FR I	413.1 246.5 166.6	10.1	IOX	$1.237 - 0.001x - 0.046e^x$
J154901.7-321747 J154854.8-321557 J154908.6-321938	FR II	836.6 389.3 447.3	9.2	–	$1.302 - 0.046e^x$
J170502.0-244602	FR I	1287.9	8.0	IO	$1.305 - 0.001x - 0.032e^x$
J175643.3-263829 J175639.8-264023 J175646.7-263635	FR I	100.7 50.4 50.3	17.4	–	$-0.149 - 0.220x$
J185618.6+013120 J185609.6+013309 J185627.6+012930	FR I	1560.3 811.4 748.9	18.0	–	$6.572 - 1.986x$
J195230.9-011711	FR I	1609.5	8.4	–	$2.169 - 0.187x - 0.139x^2$

1	2	3	4	5	6
J195223.0-011557		728.3			
J195238.4-011857		343.3			
J195232.4-011734		537.9			
J210138.4-280158	FR I	2672.1	6.7	IO	$3.288 - 0.812x$
J210139.5-280321		2054.6			
J210141.2-275830		707.5			
J223115.9+392501	FR I	882.7	13.8	XIO	$1.655 - 0.484x$
J224548.5+394113	FR I	6151.8	5.8	IO	$2.513 + 0.088x - 0.175x^2$
J224539.7+394054		3215.8			
J224557.3+394133		2936.0			
J235721.0+475238	FR I	396.9	10.6	O	$1.856 - 0.671x$

Таблица 1.2: БРГ типа FR I, детектированных методом сопоставления осей компонентов. Совместный результат диссертанта из работы [A2]

Имя	Тип	Пл. потока, мЯн (1.4 ГГц)	Разм., '	XIO	Спектр
1	2	3	4	5	6
J000041.4+121445	FR II	247.7	10.1	–	$0.422 - 0.000x - 0.039e^x$
J000037.0+121226		136.1			
J000037.0+121226		111.6			
J001748.5-222256	FR II	354.2	9.8	IO	$0.664 - 0.000x - 0.045e^x$
J001741.7-222513		233.3			
J001741.7-222513		120.9			
J005108.0-202818	FR II	157.6	8.6	IO	$-0.218 - 0.159x$
J005100.7-203041		78.7			
J005100.7-203041		78.9			
J005331.6+403059	FR II	109.2	9.7	IO	$12.490 - 7.998x + 1.162x^2$
J005331.6+402831		57.9			
J005331.6+402831		51.3			
J011203.6+493004	FR II	497.2	14.0	IO	$2.890 - 0.826x$
J011200.3+492737		159.8			
J011200.3+492737		337.4			
J015302.5+711559	FR II	442.7	7.3	IO	$0.913 - 0.045x - 0.067x^2$
J015251.8+711630		149.3			
J015251.8+711630		293.4			

1	2	3	4	5	6
J015756.3+020950 J015745.3+021004 J015745.3+021004	FR II	350.3 163.5 186.8	8.7	IO	$3.845 - 1.326x$
J031821.9+682932 J031747.1+682508 J031747.1+682508	FR II	323.4 171.2 152.2	17.1	IO	$3.581 - 1.222x$
J071244.0-085019 J071235.5-085042 J071235.5-085042	FR II	426.2 218.3 207.9	7.1	IO	$1.791 - 0.688x$
J080244.1-095757 J080232.5-095733 J080232.5-095733	FR II	1036.8 252.6 784.2	12.2	-	$1.118 - 0.001x - 0.036e^x$
J082128.4-301124 J082120.2-301001 J082120.2-301001	FR II	3216.2 2027.6 1188.6	8.9	IO	$2.866 - 0.775x$
J091251.6+350929 J091250.2+350639 J091250.2+350639	FR II	157.6 101.0 56.6	8.2	O	$-1.349 + 1.562x - 0.451x^2$
J102054.5+483044 J102051.8+483306 J102051.8+483306	FR II	940.5 295.5 645.0	8.9	IOX	$3.034 - 0.943x$
J111141.9-132417 J111134.7-132545 J111134.7-132545	FR II	155.5 56.6 98.9	8.4	-	$1.781 - 0.755x$
J113538.0+390154 J113530.3+390236 J113530.3+390236	FR II	106.4 50.6 55.8	6.7	-	$-3.882 + 2.770x - 0.579x^2$
J115909.1+582041 J115858.0+582022 J115858.0+582022	FR II	147.8 69.0 78.8	6.7	IO	$0.491 - 0.001x - 0.038e^x$
J123846.9+440949 J123838.4+441057 J123838.4+441057	FR II	228.6 84.8 143.8	6.7	IO	$0.950 + 0.047x - 0.168x^2$
J142554.6-080401 J142546.6-080245 J142546.6-080245	FR II	463.9 155.2 308.7	7.8	-	$1.179 - 0.478x$
J172331.0-352542	FR II	278.6	11.5	-	

1	2	3	4	5	6
J172330.9-352326		190.4			
J172330.9-352326		88.2			
J182708.3-124020	FR II	935.8	9.6	IO	$-0.396 + 1.008x - 0.154x^2$
J182704.8-123749		423.6			
J182704.8-123749		512.2			
J184133.3-015251	FR II	5871.6	8.0	-	$3.214 - 0.778x$
J184124.4-015255		3053.1			
J184124.4-015255		2818.5			
J185528.6-071613	FR II	110.5	7.4	-	
J185520.5-071533		55.2			
J185520.5-071533		55.3			
J191918.2+514208	FR II	179.4	7.8	-	$0.315 - 0.001x - 0.037e^x$
J191912.3+514010		114.3			
J191912.3+514010		65.1			
J194348.3-354651	FR II	358.1	9.2	IO	$2.499 - 0.954x$
J194346.8-354903		69.2			
J194346.8-354903		288.9			
J202339.8+170350	FR II	525.8	8.2	IOX	$-1.873 + 2.347x - 0.549x^2$
J202336.7+170139		365.3			
J202336.7+170139		160.5			
J213208.6+342057	FR II	119.5	9.6	IO	$0.777 - 0.501x$
J213201.9+342241		58.3			
J213201.9+342241		61.2			
J223536.0+373523	FR II	246.4	8.4	IO	$0.216 - 0.001x - 0.036e^x$
J223534.4+373749		163.2			
J223534.4+373749		83.2			
J225321.7+162014	FR II	183.7	9.4	IO	$2.410 - 0.944x$
J225319.7+162226		96.0			
J225319.7+162226		87.7			
J231600.3-282359	FR II	301.6	10.2	O	$1.976 - 0.783x$
J231555.2-282640		152.4			
J231555.2-282640		149.2			

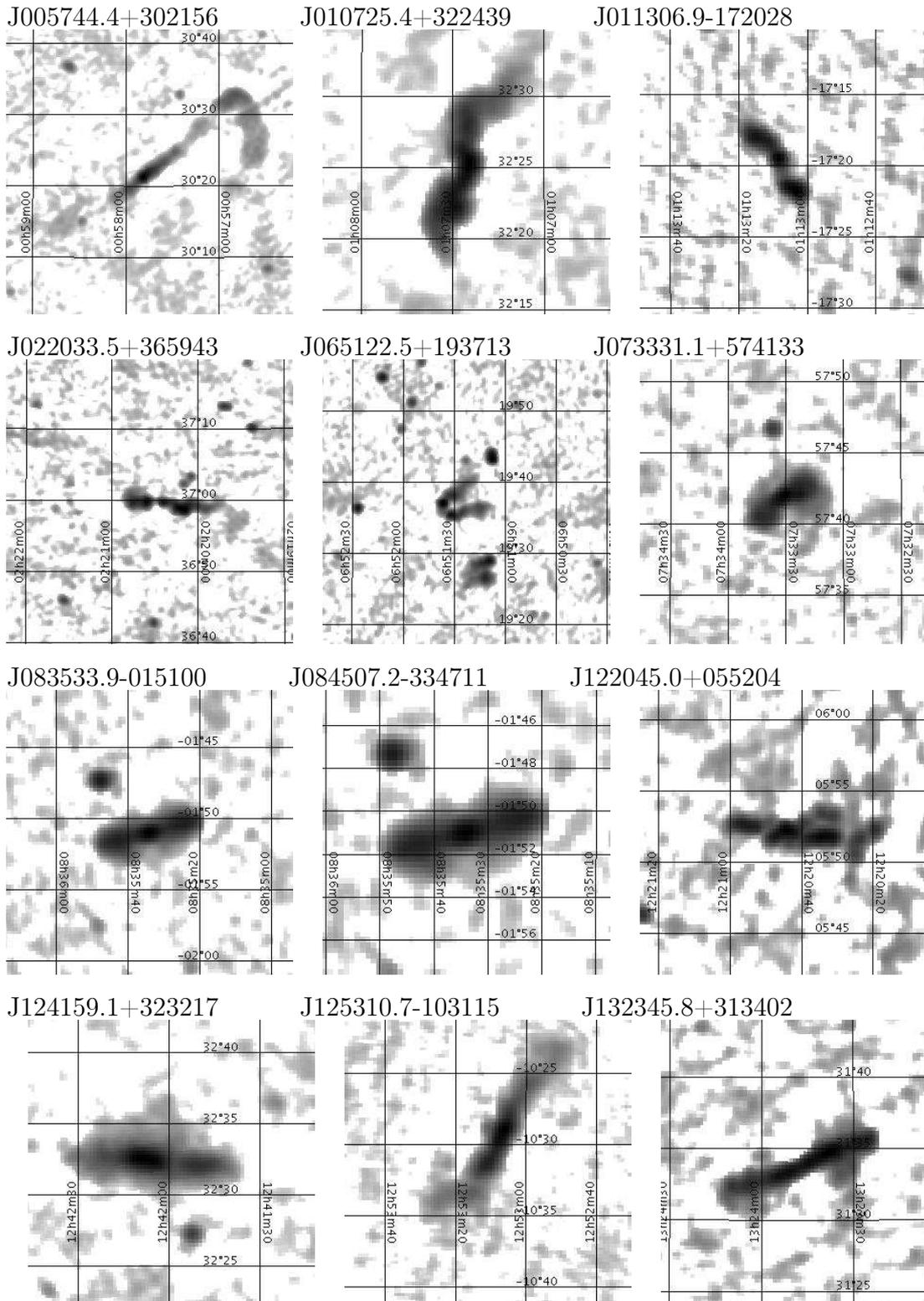


Рис. 1.1: Изображения больших радиогалактик типа FRI, детектированных методом соответствия осей, по данным обзора NVSS. Совместный результат диссертанта из работы [A2]

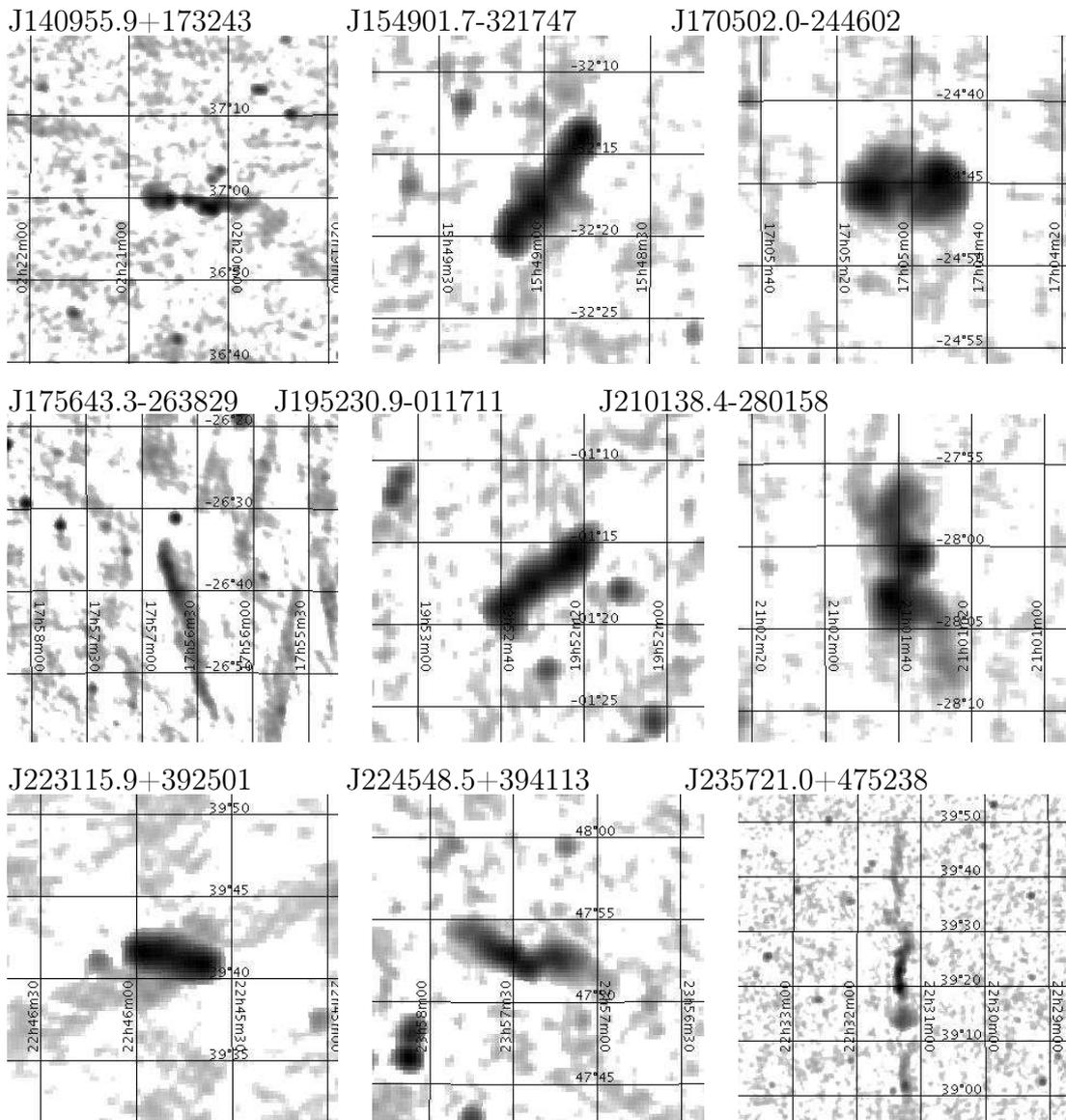


Рис. 1.3: Продолжение. Изображения больших радиогалактик типа FRI, детектированных методом соответствия осей, по данным обзора NVSS. Совместный результат диссертанта из работы [A2]

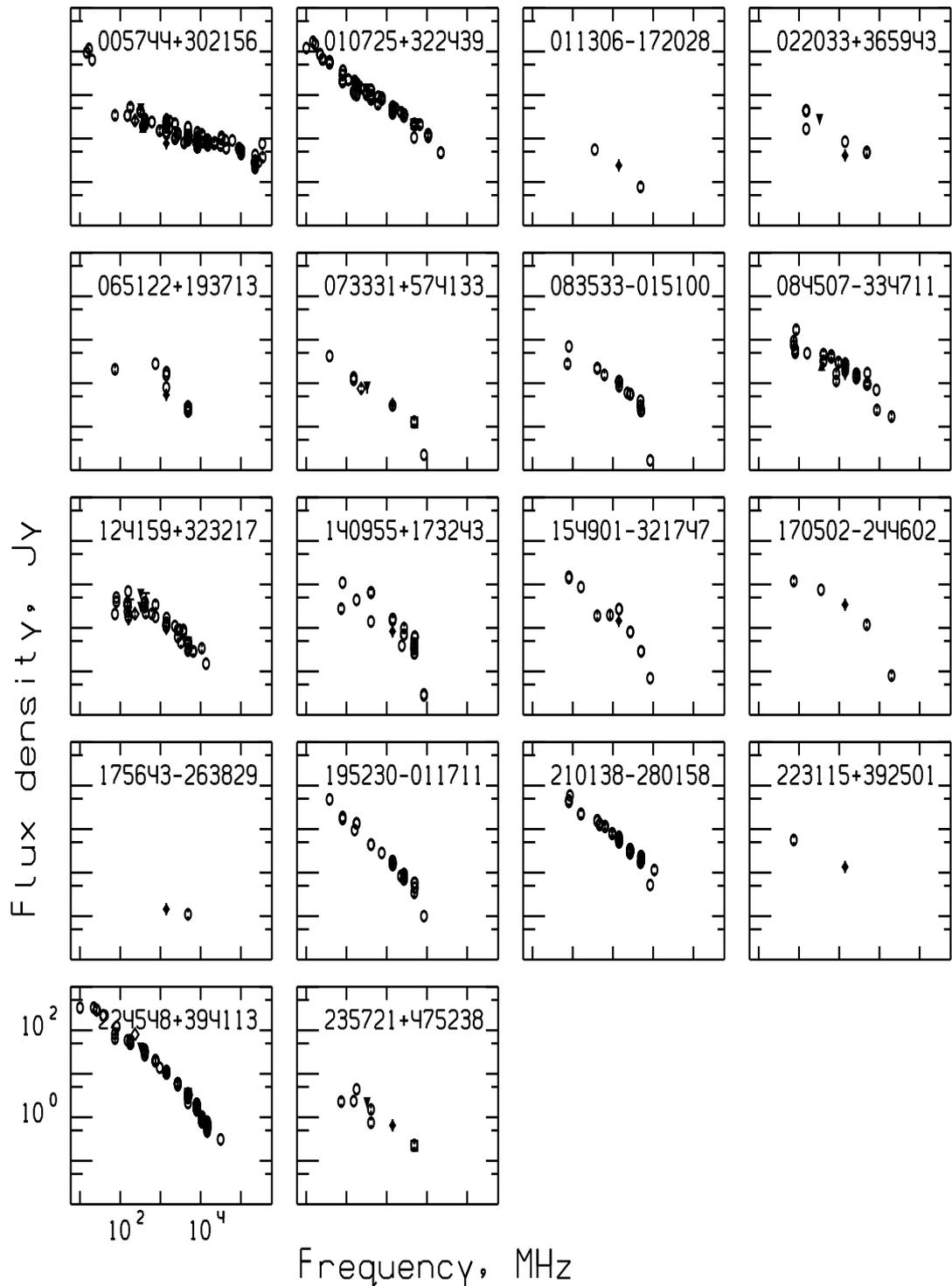


Рис. 1.4: Непрерывные радиоспектры БРГ типа FR I по результатам отождествления в CATS. Совместный результат диссертанта из работы [A2]

1.3.1 Комментарии к отдельным источникам

В первой части приведены комментарии к источникам типа FR I. На Рис.1.1 и 1.3 показаны изображения из обзора NVSS и их радиоспектры, построенные по результатам

отождествления в БД CATS.

J005744.4+302156. Радиоисточник типа FR I с характерным падением яркости от центра к краям структуры и контрастным радиоджетом. Отождествляется в оптике с эллиптической галактикой NGC 315 с видимой звездной величиной $11^m.2$. Также отчетливо виден в инфракрасном и рентгеновском диапазоне. Детали структуры также наблюдаются на карте миссии Планк на частоте 100 ГГц.

J010725.4+322439. Радиоисточник типа FR I с характерным падением радиояркости от центра к краям структуры; при этом наблюдается многократное изгибание радиоструктуры. Каталогизирован как 3C 31 и 4C+32.05. Родительская галактика — NGC 383 ($12^m.14$) наблюдается в инфракрасном и рентгеновском диапазонах. Детали структуры также видны на карте миссии Планк на частоте 100 ГГц (Рис. 1.5).

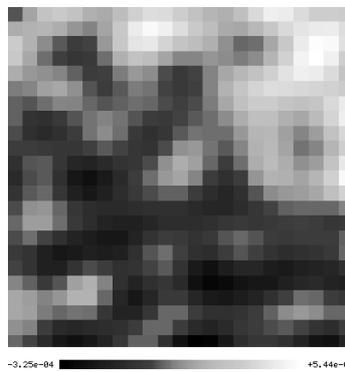


Рис. 1.5: В центре изображения источник J010725.4+322439 на карте ($30' \times 30'$) космической миссии Планк на частоте 100 ГГц. Совместный результат диссертанта из работы [A2]

J011306.9-172028. Радиоисточник типа FR I имеет структуру, напоминающую форму 'S', в которой можно выделить три области повышенной радиояркости: одну в центре и две симметрично от центра, расположенные практически параллельно друг другу. Объект отождествляется в оптическом и инфракрасном диапазонах.

J022033.5+365943. Радиоисточник типа FR I, имеющий сложную несимметричную структуру с выделяющимися областями ближе к центру. Родительская галактика — MCG+06-06-021 и ($B=15^m$).

J065122.5+193713. Радиогалактика необычной формы с вытянутыми в одном направлении протяженными радиокомпонентами. Отождествляется в оптике и с ИК источником 2MASX J06513590+1935513 ($V=15^m.5$).

J073331.1+574133. Радиогалактика с выделяющимся центром и широкими радиокомпонентами. Отождествляется в оптике и ИК диапазоне (объект MCG+10-11-077, $\sim 16^m$).

J083533.9-015100. Радиогалактика типа FRI с выделяющимся центром и двумя симметрично расположенными широкими радиокомпонентами. Отождествляется в оптике и инфракрасном диапазонах с объектом NGC 2616 (видимая величина $12^m.7$). Каталогизирован как PKS 0833-016.

J084507.2-334711. Вытянутая радиогалактика с плавным нарастанием радиояркости к центру. Уверенно отождествляется с NGC 2663 в оптике и инфракрасном диапазоне (видимая величина 10^m9). Радиоисточник каталогизирован как PKS 0843-336. Виден на карте Планка 100 ГГц.

J122045.0+055204. Радиоисточник типа FR I имеет сложную структуру из множества ярких пятен. В оптическом диапазоне отождествляется со слабым диффузным объектом $r=21^m3$ (SDSS). В инфракрасном (2MASS) и рентгеновском диапазоне отождествление отсутствует. Также отсутствует и радиоотождествление в базе данных CATS с данными других каталогов.

J124159.1+323217. Радиогалактика типа FR I в виде сложной вытянутой структуры с выделяющейся центральной областью. Радиоизображение повторяет структуру галактики в оптике. Отождествляется с объектом NGC 4631 (видимая величина 9^m).

J125310.7-103115. Радиоисточник типа FR I с характерным для морфологического типа падением радиояркости к краям структуры. Каталогизирован как PKS 1250-102. Отождествляется в оптике с NGC 4760 (видимая величина 11^m6). Излучает в инфракрасном и рентгеновском диапазонах.

J132345.8+313402. Радиоисточник типа FR I симметричной гантелевидной формы, имеющий тем не менее нарастание радиояркости к центру структуры. Отождествляется в оптике и инфракрасном диапазоне с NGC 5127 (видимая величина 12^m5).

J140955.9+173243. Вытянутый вдоль одной линии радиоисточник типа FR I, отождествляется с эллиптической галактикой NGC 5490 (известной также как NGC 5490A, UGC 9058, MCG+03-36-65, ZWG 103.95, PGC 50558). Видимая звездная величина 12^m0 . Объект является источником инфракрасного и рентгеновского излучения.

J154901.7-321747. Радиогалактика типа FR II имеет типичную для своего класса гантелевидную форму, за исключением наличия еще одной меньшей протяженной структуры, пересекающей под углом центр и с убывающим распределением радиояркости как с FR I. Можно ее отнести к отдельному типу 'X'. В оптическом, инфракрасном и рентгеновском диапазоне отождествлений получено не было.

J170502.0-244602. Радиогалактика сложной формы с выделяющимся центром и двумя протяженными источниками, закрученными вокруг центра. Отождествляется в оптике и инфракрасном диапазоне (объект 2MASX J17050125-2445099).

J175643.3-263829. Протяженная радиогалактика с практически равномерным распределением радиояркости. В других диапазонах не отождествляется.

J195230.9-011711. Радиоисточник типа FR I имеет практически равномерное распределение радиояркости по всей структуре со слегка выделяющимся ядром и радиокомпонентам. Каталогизирован как 3CR 403.1, 4C-01.51 и PKS 1949-014. Отождествляется с галактикой 2MASS ($K_s=12^m2$).

J210138.4-280158. Радиоисточник типа FR I с сильно изогнутой структурой в радиодиапазоне с двумя выделяющимися пятнами, расположенными от центра симметрично

друг напротив друга. Каталогизирован как PKS 2058-282. В оптике отождествляется с NGC 6998 (видимая величина 14^m2) и инфракрасном диапазоне.

J223115.9+392501. Радиогалактика типа FR I имеет несимметричную структуру, с дроблением на отдельные области по мере удаления от центра. Отождествляется с источником UGC 12064 (14^m5). Также виден в инфракрасном и рентгеновском диапазонах.

J224548.5+394113. Гантелевидная радиогалактика со слабо выделяющимися радиокомпонентами. Каталогизирован как 3C 452 и 4C+39.71. Отождествляется с сейфертовской галактикой 16^m6 . Является инфракрасных источником.

J235721.0+475238. Радиогалактика типа FR I со сходящимися под небольшим углом радиокомпонентами. Принадлежит к группе галактик CGPG 2354.9+4736.

Далее приводим комментарии к источникам списка, имеющим тип FR II. На Рис.1.6 и 1.7 показаны изображения из обзора NVSS и их радиоспектры, построенные по результатам отождествления в БД CATS.

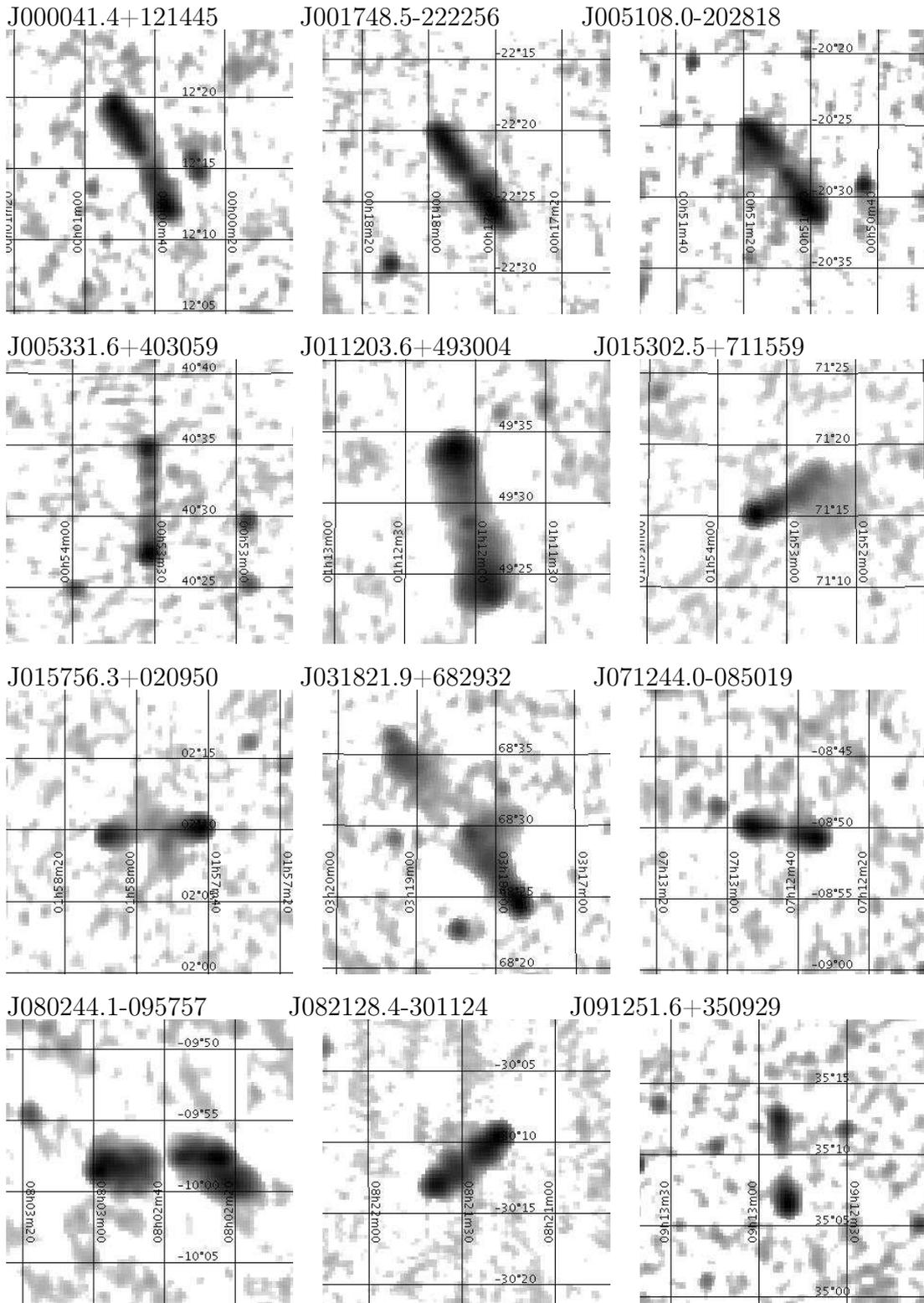


Рис. 1.6: Изображения больших радиогалактик типа FR II, детектированных методом соответствия осей, по данным обзора NVSS. Совместный результат диссертанта из работы [A2]

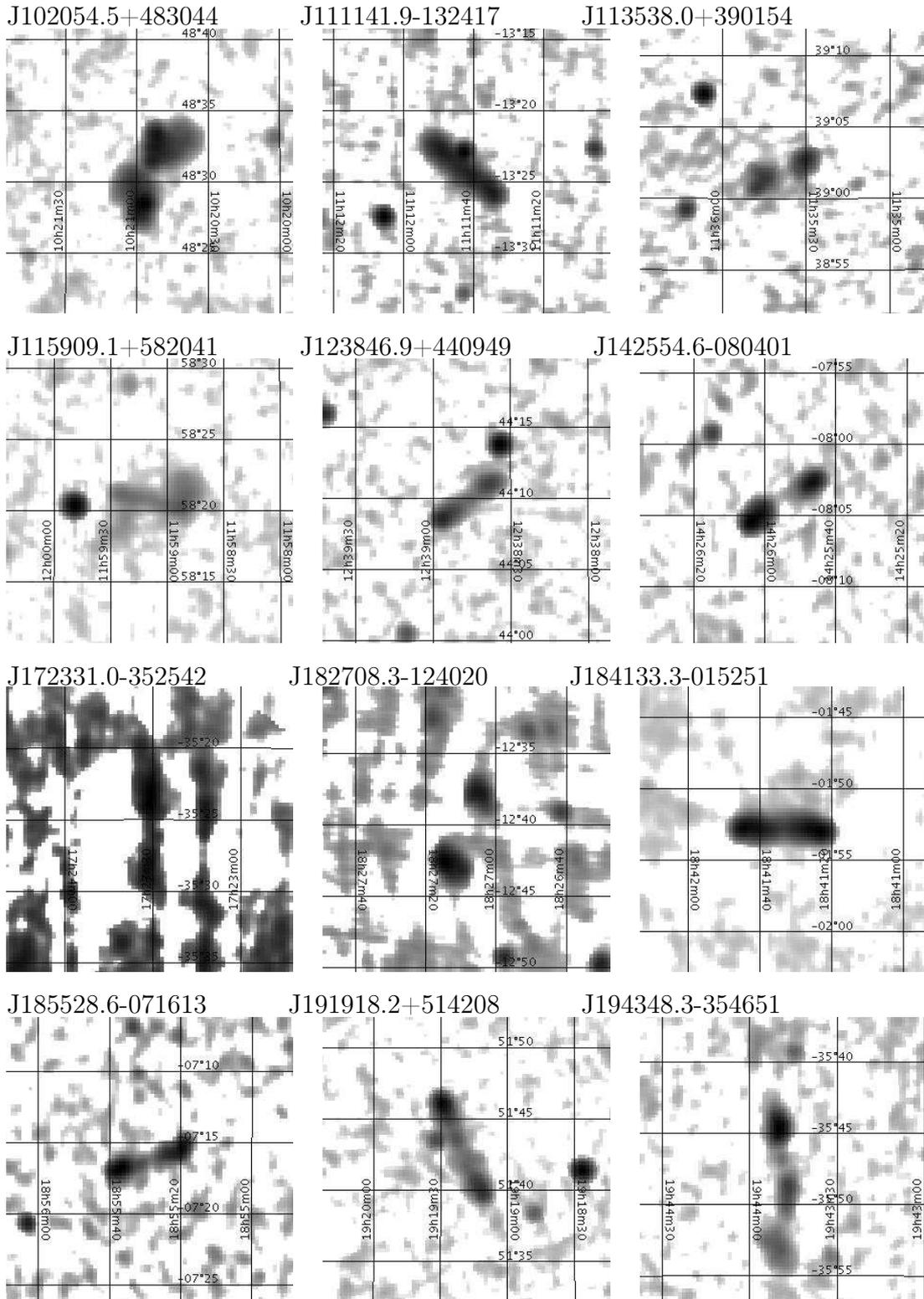


Рис. 1.6: Продолжение. Изображения больших радиогалактик типа FR II, детектированных методом соответствия осей, по данным обзора NVSS. Совместный результат диссертанта из работы [A2]

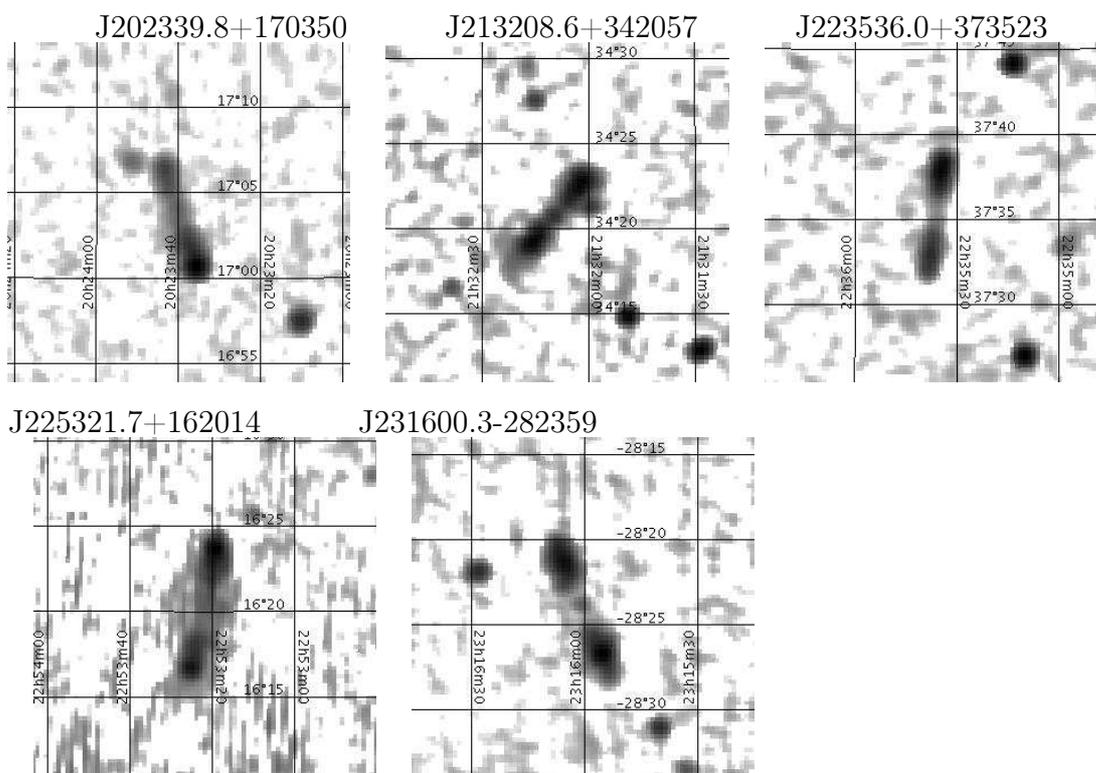


Рис. 1.6: Продолжение. Изображения больших радиогалактик типа FR II, детектированных методом соответствия осей, по данным обзора NVSS. Совместный результат диссертанта из работы [A2]

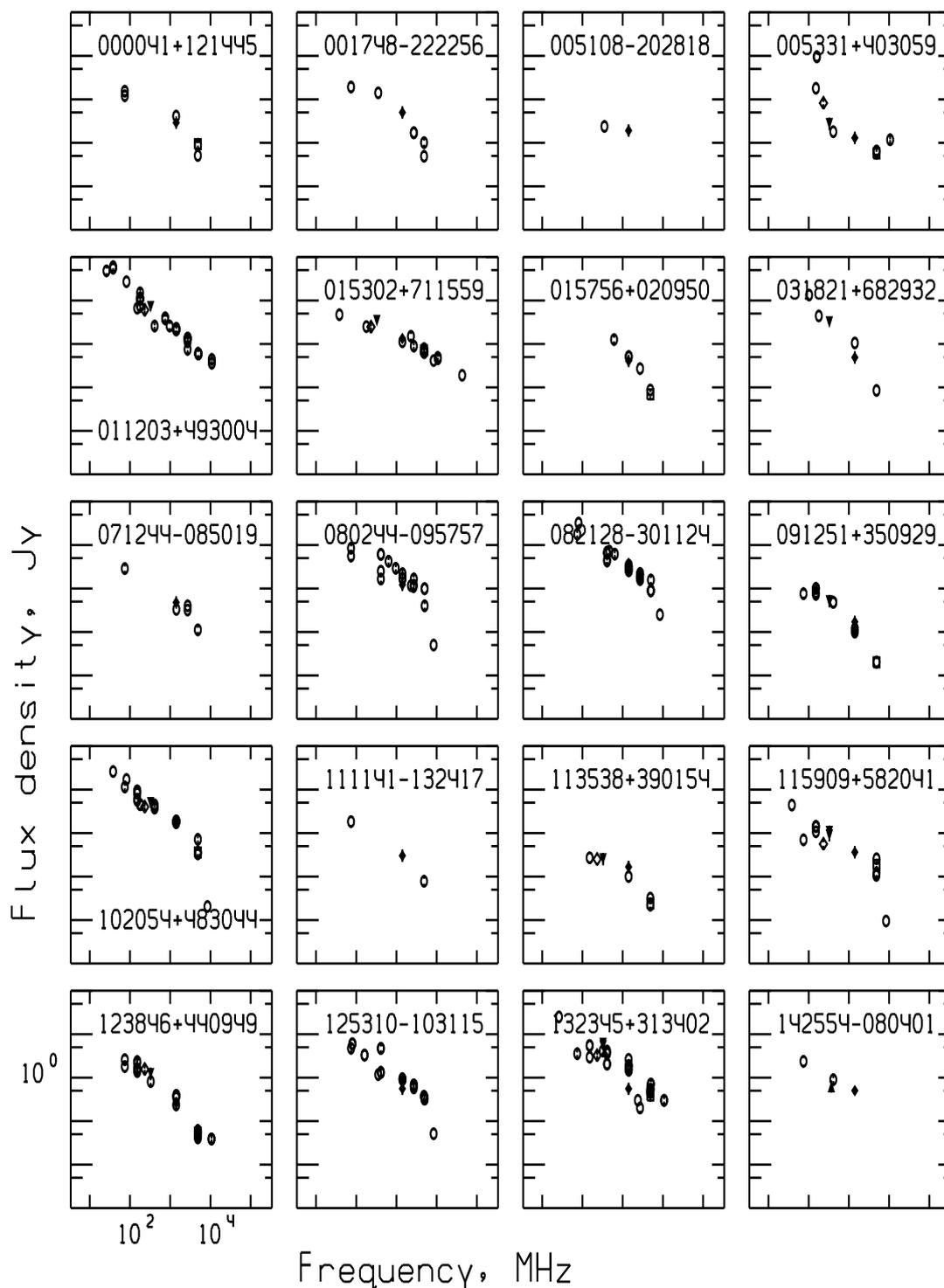


Рис. 1.7: Непрерывные радиоспектры БРГ типа FR II по результатам отождествления в CATS. Совместный результат диссертанта из работы [A2]

J000041.4+121445. Радиогалактика типа FR II с небольшим углом между радиокомпонентами. В оптике, рентгене и инфракрасном диапазоне отождествлений найдено не было.

J001748.5-222256. Почти симметричная радиогалактика типа FR II со слабым падением радиояркости к центру. Каталогизирован как PKS 0015-226. Возможный кандидат

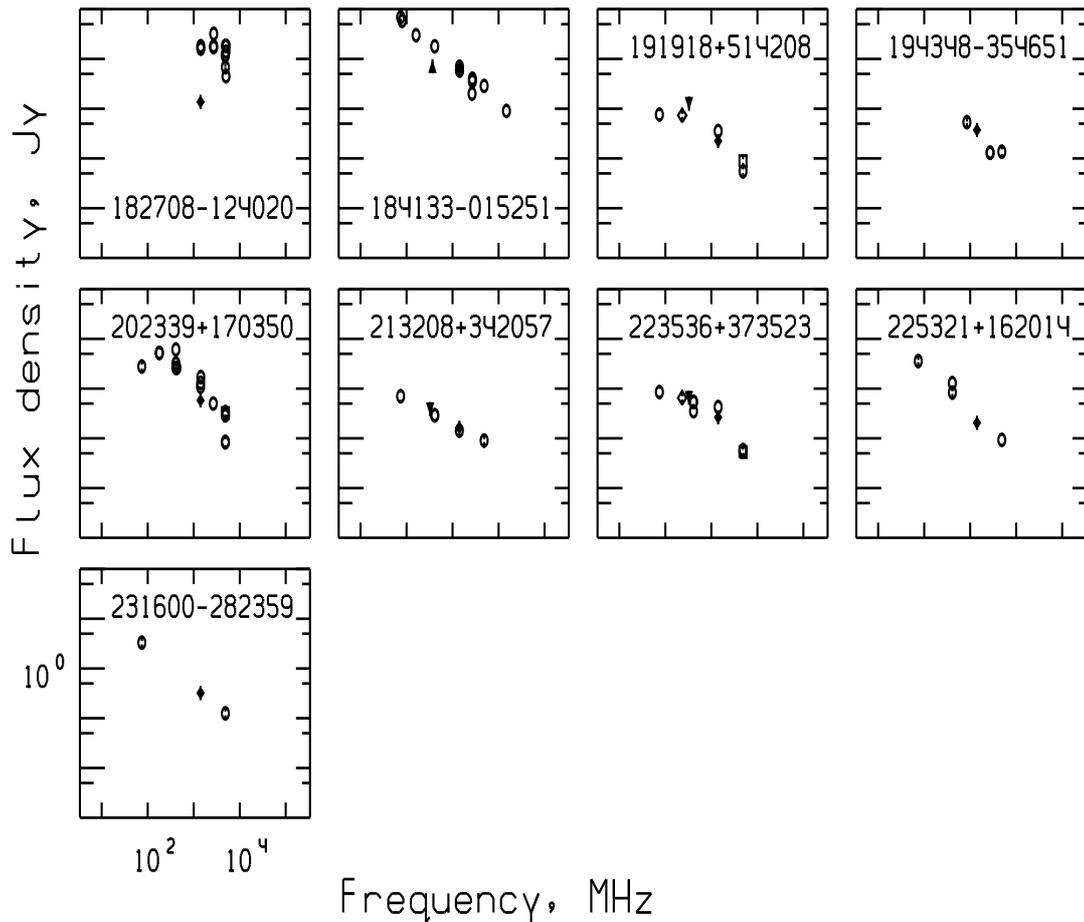


Рис. 1.7: Продолжение. Непрерывные радиоспектры БРГ типа FR II по результатам отождествления в БД CATS. Совместный результат диссертанта из работы [A2]

на отождествление в оптическом и ИК диапазонах (Рис. 1.8): 2MASX J00174780-2223195 ($B=20^m41$).

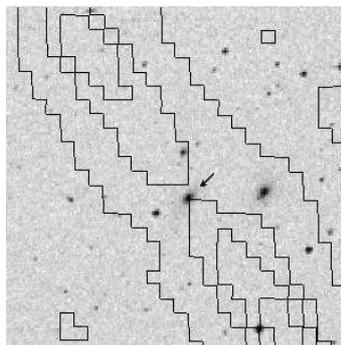


Рис. 1.8: Кандидат на отождествление РГ J001748.5-222256 — галактика 2MASX J00174780-2223195. Изолинии построены по данным обзора NVSS на изображении DSS. Кандидат отмечен стрелкой. Размер изображения $6' \times 6'$. Совместный результат диссертанта из работы [A3]

J005108.0-202818. Радиогалактика типа FR II с несколько выделяющимся нижним радиокомпонентом. Отождествляется с объектом 6dFGS gJ005107.1-202825 ($B=16^m6$). Явля-

ется ИК источником.

J005331.6+403059. Радиогалактика типа FR II стандартной гантелевидной формы со слабо выделяющимся центром. Отождествляется в сейфертовской галактикой 2MASX J00533165+4031255 ($V=18^m8$). В рентгеновском диапазоне отождествлений найдено не было. Каталогизирован как 3C 24.

J011203.6+493004. Радиоисточник типа FR II стандартной гантелевидной формы с выделяющимися концами радиокомпонент и центром. Отождествляется с квазаром 3C 35 (4C+49.04). Отождествляется в оптическом (15^m6) и инфракрасном диапазонах.

J015302.5+711559. Радиогалактика с сильно смещенным центром, отождествляется с объектом 8C 0149+710 (объект типа BL Lac). Видна в оптике ($\sim 15^m5$) и инфракрасном диапазоне.

J015756.3+020950. Радиогалактика гантелевидной формы с несколько раздробленной структурой ближе к центру. Кандидат на отождествление на снимке DSS: ARMUKS B015517.56+015518.5 ($B=20^m08$).

J031821.9+682932. Радиогалактика типа FR II с четко разделенными радиокомпонентами, один из которых превосходит другой по яркости. У наиболее яркого компонента ближе к центру имеется перпендикулярно расположенная небольшая структура. Объект отождествляется с сейфертовской галактикой 2MASX J03181899+6829322.

J071244.0-085019. Радиогалактика типа FR II с характерным падением радиояркости от периферии к центру структуры. На карте Планка 100 ГГц в области радиоисточника расположен минимум излучения (Рис. 1.9). Отождествляется с галактикой 2MASX J07124386-0850176. В рентгеновском диапазоне не обнаружен.

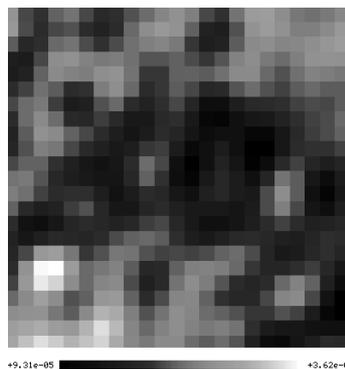


Рис. 1.9: В центре изображения минимум излучения на месте источника J071244.0-085019 на карте ($30' \times 30'$) космической миссии Планк на 100 ГГц. Совместный результат диссертанта из работы [A3]

J080244.1-095757. Радиоисточник со сложной структурой с двумя выделяющимися радиокомпонентами различной формы и ненаблюдаемым ядром. Кандидат на отождествление галактика 2MASX J08024016-0957504. Каталогизирован как PKS 0800-098.

J082128.4-301124. Гантелевидная радиогалактика типа FR II со слабым падением радиояркости к центру структуры. Отождествляется в оптике и инфракрасном диапазоне с

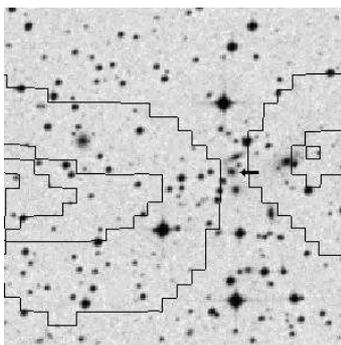


Рис. 1.10: Кандидат на отождествление РГ J080244.1-095757 — галактика 2MASX J08024016-0957504. Изолинии построены по данным обзора NVSS на изображении DSS. Кандидат отмечен стрелкой. Размер изображения $6' \times 6'$. Совместный результат диссертанта из работы [А3]

объектом 2MASX J08212682-3011030. Каталогизирован как PKS 0819-300.

J091251.6+350929. Радиогалактика типа FR II с выделяющимися радиокомпонентами и практически не светящим в радиодиапазоне центром. Отождествляется с одной из галактик компактной группы галактик SDSSCGB 23048.

J102054.5+483044. Радиоисточник, по всей видимости представляющий собой взаимодействующие радиогалактики. Отождествляется с объектом KPAIR J1020+4831 (пара галактик). Внешне выглядит как два протяженных радиообъекта, направленные друг к другу под небольшим углом, с затухающими шлейфами, направленными в противоположные стороны. Каталогизирован как 4C+48.29. В ИК диапазоне — галактика 2MASX J10205188+4831096 (17^m). В области радиогалактики имеется рентгеновский источник. В $2'$ -окрестности объекта повышенное число (~ 70) фоновых галактик SDSS 20^m - 22^m , для части из них измеренно на красное смещение $z=0.053$.

J111141.9-132417. Радиогалактика типа FR II со слабым падением радиояркости к центру и практически постоянной шириной структуры. В оптике, рентгене и инфракрасном диапазоне отождествлений получено не было.

J113538.0+390154. Радиогалактика, представленная двумя обособленными радиокомпонентами. В оптике, рентгене и инфракрасном диапазоне отождествлений найдено не было. В $2'$ -окрестности объекта повышенное число (~ 80) фоновых галактик SDSS 20^m - 22^m , для части из них измеренно на красное смещение $z=0.15$ – 0.17 .

J115909.1+582041. Радиогалактика со слабо выраженной гантелевидной формой. В противоположных направлениях от радиокомпонентов отходят слабые структуры, что может говорить о вращении радиогалактики. $B=15^m7$.

J123846.9+440949. Радиогалактика типа FR II гантелевидной формы. Отождествлений в других диапазонах не найдено.

J142554.6-080401. Радиогалактика типа FR II с резко выделенными радиокомпонентами и отсутствующим центром. Виден на карте Планка на частоте 100 ГГц (Рис. 1.11). Отож-

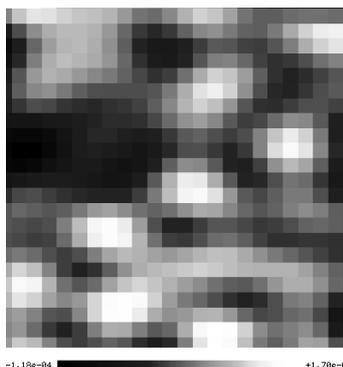


Рис. 1.11: В центре изображения источник J142554.6-080401 на карте ($30' \times 30'$) космической миссии Планк на 100 ГГц. Совместный результат диссертанта из работы [А3]

дествлений в других диапазонах не найдено.

J172331.0-352542. Слабый радиисточник типа FR II. Отождествлений в других диапазонах получено не было.

J182708.3-124020. Два радиоконпонента с практически не выделяющейся между ними связью. В оптике и рентгене пусто, в инфракрасном диапазоне по центру расположен объект, возможно связанный с радиогалактикой. В область радиисточника попадает пара галактик CGMW 3-2209. Источник был отобран в каталог кандидатов в НII-области как G18.9-0.5. Виден на карте Планка 100 ГГц.

J184133.3-015251. Типичная радиогалактика типа FR II с падением радиояркости от краев структуры в центре. Отождествлений в других диапазонах найдено не было. Источник был отобран в каталог кандидатов в SNR.

J185528.6-071613. Радиогалактика типа FR II с типичной формой структуры. Один из радиоконпонентов несколько ярче другого. В других диапазонах отождествлений найдено не было.

J191918.2+514208. Радиогалактика типа FR II со смещенным относительно центра радиоконпонент яркостным центром в сторону одной из них; недалеко от этого центра также наблюдается небольшая структура, расположенная под углом к основной радиогалактике. Одна из радиоконпоненты имеют различную яркость. На карте Планка 100 ГГц в области радиисточника расположен минимум излучения (Рис. 1.12). Радиогалактика не отождествляется в оптике, инфракрасном диапазоне и рентгене.

J194348.3-354651. Радиогалактика типа FR II со слабо выделяющимся центром и радиоконпонентами различной яркости. Отождествляется в оптике и инфракрасном диапазоне с объектом 2MASX J19434935-3546460 ($B \sim 17^m$). Каталогизирован как PKS 1940-358.

J202339.8+170350. Радиогалактика типа FR II с несимметричными по яркости радиоконпонентами. Радиисточник каталогизирован как 4C+16.68 и PKS 2021+16. Кандидат на отождествление — галактика 2MASX J20233698+1702409. В области радиогалактики имеется рентгеновский источник.

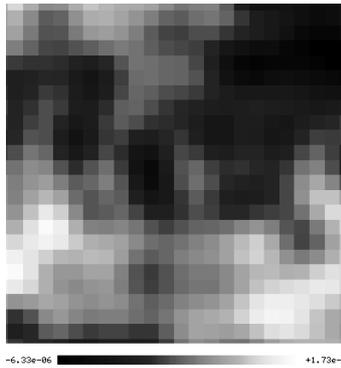


Рис. 1.12: В центре изображения минимум излучения на месте источника J191918.2+514208 на карте ($30' \times 30'$) космической миссии Планк на 100 ГГц. Совместный результат диссертанта из работы [А3]

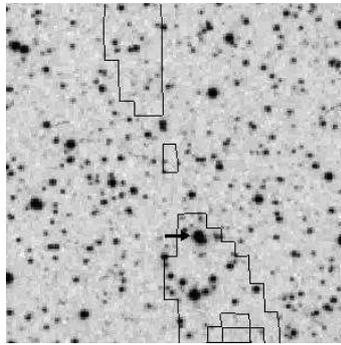


Рис. 1.13: Кандидат на отождествление РГ J202339.8+170350 — галактика 2MASX J20233698+1702409. Изолинии построены по данным обзора NVSS на изображении DSS. Кандидат отмечен стрелкой. Размер изображения $6' \times 6'$. Совместный результат диссертанта из работы [А3]

J213208.6+342057. Радиогалактика типа FR II стандартной гантелевидной формы со слабо выделяющимся центром. Отождествляется со слабой галактикой на оптической и ИК картах — 2MASX J21320953+3420448.

J223536.0+373523. Симметричная радиогалактика типа FR II. В области центра радиогалактики есть слабые диффузные объекты на карте DSS и 2MASS.

J225321.7+162014. Слабая радиогалактика типа FR II с расположенными под малым углом друг к другу радиоконпонентами. В оптическом и ИК диапазоне отождествляется с галактикой 2MASX J22532268+1620056.

J231600.3-282359. Радиогалактика типа FR II с выделяющимися радиоконпонентами и точечным ярким центральным источником. Отождествляется в оптике с объектом 2dFGRS TGS266Z204 ($B \sim 18^m6$).

Глава 2

Галактики с признаками слияния

2.1 Введение

Полные обзоры неба и открытый доступ к архивным данным позволяют увеличивать выборку и исследовать объекты редких морфологических типов. Среди радиогалактик можно выделить несколько сравнительно мало встречающихся классов объектов, увеличение выборок которых требуется для исследования свойств популяции, — это гигантские радиогалактики, радиоисточники с S-формой и с X-формой, радиогалактики с избытком субмиллиметрового излучения, гравитационные линзы и другие. Наличие мощного радиоизлучения в радиогалактиках является признаком случившегося слияния галактик, которое и инициировало активность квазара внутри звездной системы. Морфология радиогалактик позволяет исследовать различные стадии активности объектов, вызванные слиянием галактик и их ядер. Одним из наблюдаемых следствий процесса слияния является прецессия оси вращения сверхмассивной черной дыры и связанного с ней джета. Это отражается на морфологических свойствах радиоисточника и проявляется, например, в виде так называемой S-формы джета [138, 139, 140, 141, 142]. Поэтому расширение выборки радиообъектов с S-морфологией является чрезвычайно важным для анализа различных этапов слияния активных ядер.

Особый статус среди активных объектов в процессе слияния имеют радиогалактики с Икс-формой (X-shape radio galaxies), у которых распределение радиояркости в протяженных компонентах не выровнено вдоль одной оси, а представляет собой пары джетов, расположенных под сравнительно большим углом друг к другу. Число известных объектов этого морфологического типа составляет порядка 150 [71, 70, 74, 73, 72, 68, 69]. Несмотря на сложность формы радиоисточника, такие радиогалактики в основном классифицируются как радиоисточники типа FR II [10] и отождествляются с гигантскими эллиптическими галактиками. X-РГ имеют, как правило, две пары протяженных компонент далеко разнесенных друг от друга. В этих парах выделяют активные компоненты с высокой поверхностной яркостью и так называемые “крылья” с более низкой поверхностной яркостью, продуцируемые излучением плазмы, выбрасываемой вдоль оси другого джета,

не совпадающего с основным. Крылья по данным наблюдений часто имеют бóльшую величину спектрального индекса и высокую степень поляризации [68]. Лихи и Парма (1992) предположили, что крылья создаются при ранней вспышке обновленной активности ядра, когда ось джета прецессирует, и заметили, что так можно объяснить низкую поверхностную яркость крыльев, их крутой радиоспектр и высокую степень поляризации. Одно из наиболее популярных современных объяснений природы радиогалактик с X-формой (далее, X-РГ) — взаимодействие и слияние двух сверхмассивных черных дыр (СМЧД), которое приводит к быстрому изменению наклона оси вращения центрального объекта и направления выброса джета [72]. Как показано в этой работе, изменение ориентации оси джета у аккрецирующей черной дыры при образовании радиисточника X-формы может происходить за относительно короткий промежуток времени — $< 10^7$ лет. Направление оси вращения СМЧД может быстро измениться даже при слиянии с объектами, имеющими массы на порядок меньшие. В этой модели [72] вторая ЧД имеет меньшую массу и проходит около большей в центре радиогалактики при слиянии галактик. В результате формируется двойная система черных дыр, излучающая гравитационные волны. При объединении объектов и поглощении орбитального момента меньшего объекта направление оси вращения большей ЧД стремительно меняется. Соответственно меняется и направление выбрасываемых джетов, перпендикулярных оси вращения аккреционного диска, в свою очередь, перпендикулярного оси вращения ЧД. По оценкам авторов [72] даже малая ЧД с массой $1/5$ от большей в паре может изменить направление оси вращения последней на 90° при слиянии.

Заметим, что основной способ увеличить выборку S- и X-радиогалактик заключается в исследовании изображений радиисточников, зарегистрированных в обзорах неба. В данной работе, проводящейся в рамках проекта по расширению списка гигантских радиогалактик (ГРГ), мы обнаружили на основе данных NVSS 8 новых радиисточников с признаками взаимодействующих галактик, три из которых соответствуют классу X-РГ, четыре — к морфологическому типу S, S-форма которых объясняется прецессией джета РГ в результате слияния объектов, один — к парным активным ядрам. Таким образом, среди малочисленного класса ГРГ и кандидатов в эти объекты имеются объекты, демонстрирующие различные стадии слияния. Радиогалактики класса ГРГ выделяются среди радиисточников своими большими размерами, которые составляют порядка или больше 1 Мпк и сравнимы с размером скоплений галактик. На сегодняшний день, известно всего порядка 400 гигантских радиогалактик [131]. Как правило, ГРГ принадлежат к морфологическому типу FR II [10] и отождествляются в оптике с гигантскими эллиптическими галактиками и квазарами. ГРГ значительно менее распространены, чем обычные радиогалактики, что осложняет их статистическое исследование. Несколько групп [11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21] занимаются их исследованием. Как отметили Ямрози и др. [18], поскольку размеры ГРГ сравнимы с размерами групп галактик или даже большие, существование ГРГ может оказывать значительное влияние на окружающую

среду.

Ниже мы описываем новые объекты типа X-РГ, а также S-радиогалактики, найденные в списке кандидатов в ГРГ, который был составлен на основе анализа структуры слабых протяженных радиоисточников с угловыми размерами $> 4'$ [29, 30] по данным обзора NVSS [31].

2.2 Отождествление

Для проверки отождествления и поиска кандидатов в родительские галактики мы использовали базы данных оптических обзоров: оцифрованного Паломарского обзора неба (DSS) Института Космического Телескопа (STScI) и каталоги инфракрасного обзора 2MASS [36, 37]. При отождествлении в радиодиапазоне мы использовали базу данных CATS¹ [32, 33]. При расчете спектральных индексов использовались результаты кросс-идентификации в базе данных CATS с окном отождествления $180'' \times 180''$. Для удаления случайных радиообъектов поля в заданном боксе мы использовали методику анализа данных, подобную описанной в [39, 40]. Суть метода состоит в применении совместного анализа данных в координатном и спектральном пространствах для выделения вероятных отождествлений конкретных радиоисточников на различных радиочастотах. Для этих целей используется программа 'spg' [41] системы обработки континуальных радиоспектров. При описании спектров $S(\nu)$ для дальнейшего вычисления спектральных индексов мы применили параметризацию $S(\nu)$ формулой $\lg S(\nu) = A + Bx + Cf(x)$, 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 .

Аппроксимация спектров проводилась при задании ошибок плотностей потоков ΔS в соответствии с правилом: для $\nu \geq 1.5$ ГГц используемое значение ошибки ΔS_ν устанавливается равным $0.1 \cdot S_\nu$ при $\Delta S_\nu^{init} < 0.1S_\nu$, либо равным представленному в каталоге при худшей точности измерения; для $\nu < 1.5$ ГГц $\Delta S_\nu = 0.15 \cdot S_\nu$ при $\Delta S_\nu^{init} < 0.15S_\nu$, либо равно исходному в каталоге при худшей точности. Такой подход позволяет при аппроксимации уменьшить влияние (вес) низкочастотного диапазона спектра, где могут проявиться дополнительные систематические эффекты при оценке спектральной плотности потока, связанные с большим размером диаграммы направленности радиотелескопа.

Результаты аппроксимации спектров для объектов приведены в Таблице 2.1. В столбцах таблицы приведены: 1) имя в стандарте MAS, включающее координаты источника и координаты компонент; 2) тип радиоструктуры по классификации Фанарофф-Райли, 3) спектральная плотность потока в мЯн на частоте 1.4 ГГц; 4) размер объекта в мин дуги и при наличии красного смещения линейный в Мпк; 5) наличие отождествления в ИК диапазоне (I), оптическом (O) и рентгеновском (X) диапазонах; 6) красное смещение z ; 7)

¹<http://cats.sao.ru>

аппроксимационная зависимость непрерывного спектра для интегральной плотности потока. Среди основных радиокаталогов БД CATS, используемых при построении спектров

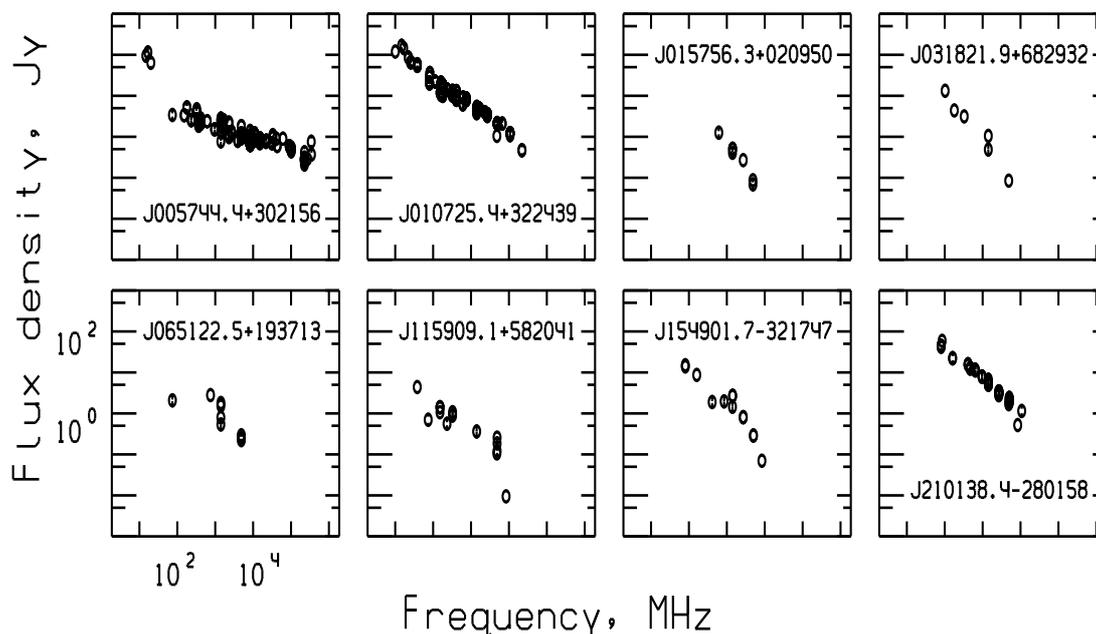


Рис. 2.1: Непрерывные радиоспектры объектов по результатам отождествления в CATS. Шкала по осям в логарифмическом масштабе. Совместный результат диссертанта из работы [A4]

кандидатов в ГРГ, отметим объекты из списков: [31, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59]. Непрерывные интегральные радиоспектры отождествленных объектов, построенные по многочастотным измерениям, показаны на Рис. 2.1.

Структура радиогалактик показана на Рис. 2.2. Изображения построены с использованием карт обзора NVSS.

2.2.1 Комментарии к источникам

Оптическое и инфракрасное отождествление кандидатов в ГРГ было проведено с применением баз данных и виртуальных обсерваторий NED² (NASA/IPAC Extragalactic Database) SkyView³, предоставляющих инструментарий для сопоставления карт разных диапазонов длин волн. Оптическое и инфракрасное отождествление объекта проводилось для центра интегрального радиоизображения. Ниже мы обсуждаем результаты этих отождествлений объектов в базах данных, а также на картах оптического, инфракрасного и субмиллиметрового диапазонов.

J005744.4+302156. Радиисточник типа FR I с характерным падением яркости от центра к краям структуры и контрастным радиоджетом. Отождествляется в оптике с эллипти-

²<http://nedwww.ipac.caltech.edu>

³<http://skyview.gsfc.nasa.gov>

Таблица 2.1: Радиогалактики с признаками слияния из списка кандидатов в ГРГ, детектированных методом сопоставления осей компонентов. В столбцах таблицы — имена источников в формате IAU, включающем координаты объекта, тип радиоструктуры по морфологическим признакам взаимодействия: S, X или P (пара), и по классификации Фанарофф-Райли, плотность потока в мЯн, угловой и линейный (если известно красное смещение z) размеры объекта, наличие отождествления: в рентгеновском диапазоне (X), ИК (I) и оптическом (O), z , аппроксимационная кривая радиоспектра. Совместный результат диссертанта из работы [A4].

Имя	Тип	$S_{1.4}$, мЯн	Разм., '/Мпк	XIO	z	Спектр
J005744.4+302156	S	586.8	8.4/0.17	XIO	0.0165	$3.155 - 1.296x + 0.120x^2$
J010725.4+322439	S	915.5	11.1/0.24	XIO	0.0170	$2.687 - 0.640x$
J015756.3+020950	X	350.3	8.7/-	IO		$3.845 - 1.326x$
J015745.3+021004		163.5				
J015807.4+020934		186.8				
J031821.9+682932	X	323.4	17.1/1.74	IO	0.0901	$3.581 - 1.222x$
J031747.1+682508		171.2				
J031802.4+682713		152.2				
J065122.5+193713	P	244.7	7.7/-	IO		$-2.581 + 2.612x - 0.562x^2$
J065114.6+193615		71.3				
J065130.5+193811		173.4				
J115909.1+582041	S	147.8	6.7/0.42	IO	0.0537	$0.491 - 0.001x - 0.038e^x$
J154901.7-321747	X	836.6	9.2/1.11	-	0.1082	$1.302 - 0.046e^x$
J154854.8-321557		389.3				
J154908.6-321938		447.3				
J210138.4-280158	S	2672.1	6.7/0.31	IO	0.0397	$3.288 - 0.812x$
J210139.5-280321		2054.6				
J210141.2-275830		707.5				

ческой галактикой NGC 315 с видимой звездной величиной 11^m2 . Радиоисточник присутствует на карте миссии Планк на частоте 100 ГГц. (Рис. 2.3). По результатам оптического отождествления радиоисточник имеет линейный размер ~ 170 кпк, что исключает его из списка ГРГ.

J010725.4+322439. Радиоисточник типа FR I с характерным падением радиояркости от центра к краям стурктуры; при этом наблюдается многократное изгибание радиоструктуры, соответствующее характерной S-форме. Каталогизирован как 3C 31 и 4C+32.05. Родительская галактика — NGC 383 (12^m14). Детали структуры также видны на картах миссии Планк: на частоте 100 ГГц и на карте реликтового излучения (Рис. 2.4). По ре-

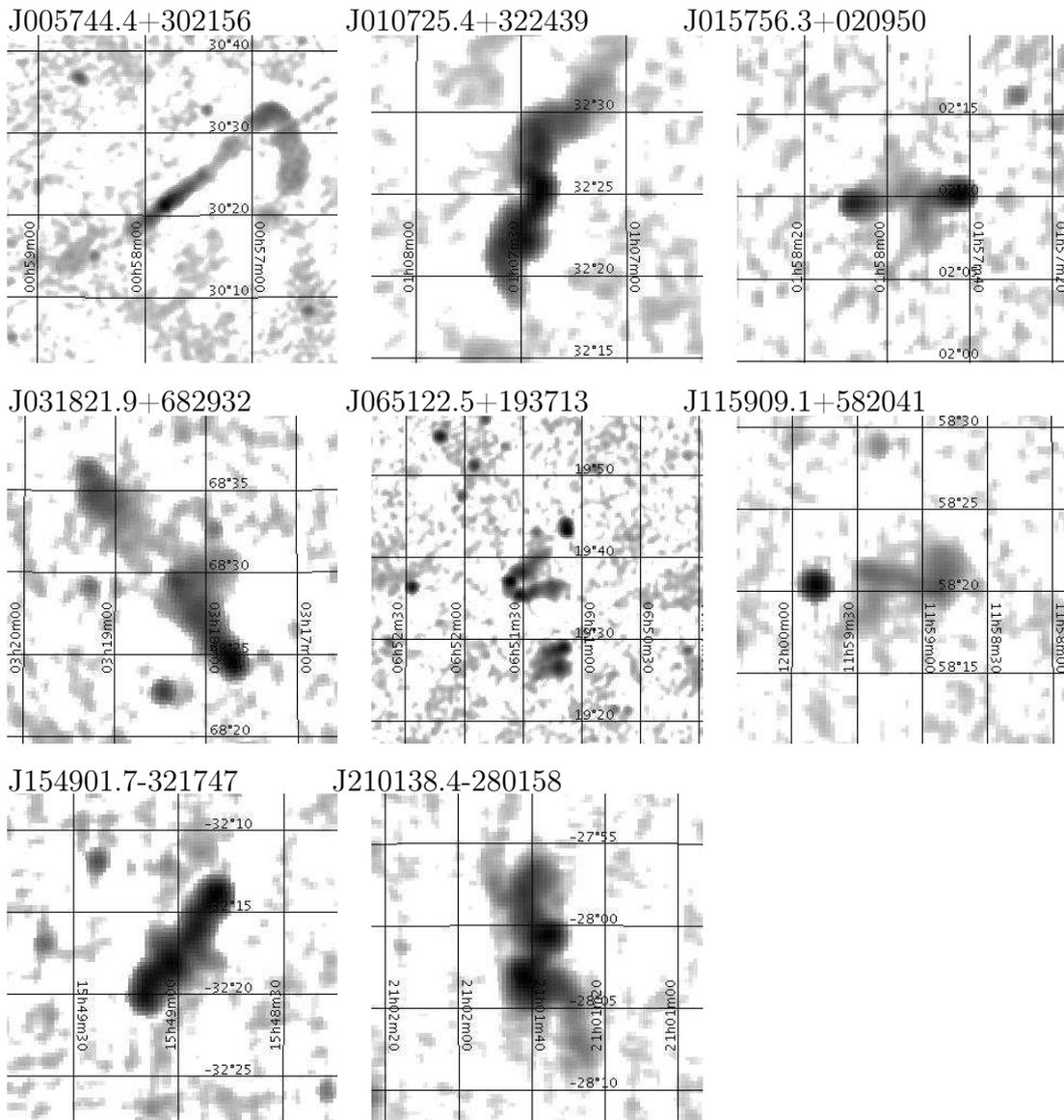


Рис. 2.2: Структура радиогалактик с признаками взаимодействия. Изображения построены с использованием карт обзора NVSS на частоте 1.4 ГГц. Совместный результат диссертанта из работы [A4].

результатам отождествления объект имеет линейный размер ~ 240 кпк, что исключает его из списка ГРГ.

J015756.3+020950. Радиогалактика типа FR II гантелевидной формы с несколько раздробленной структурой ближе к центру. Наблюдаются слабые крылья в центре радиосточника, соответствующие X-морфологии. Кандидат на отождествление на снимке DSS: ARMUKS B015517.56+015518.5 ($B=20^m08$).

J031821.9+682932. Радиогалактика типа FR II с четко разделенными радиокомпонентами, один из которых превосходит другой по яркости. У наиболее яркого компонента ближе к центру имеется перпендикулярно расположенная небольшая структура как одно из крыльев X-РГ. Объект отождествляется с сейфертовской галактикой 2MASX J03181899+6829322. По результатам отождествления объект имеет линейный размер \sim

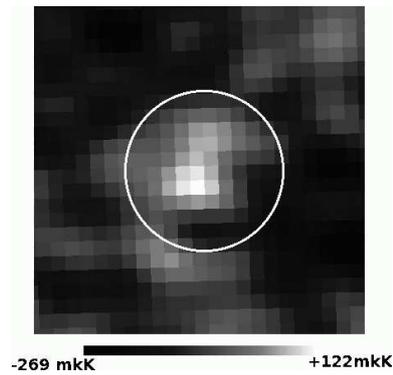


Рис. 2.3: Область, центрированная на радиогалактику J005744.4+302156, на картах космической миссии Планк с источником. Наблюдательные данные на частоте 100 ГГц. Размер площадки — $30' \times 30'$. По оси абсцисс — прямое восхождение, по оси ординат — склонение. Положение радиогалактики отмечено кружком. Совместный результат диссертанта из работы [A4].

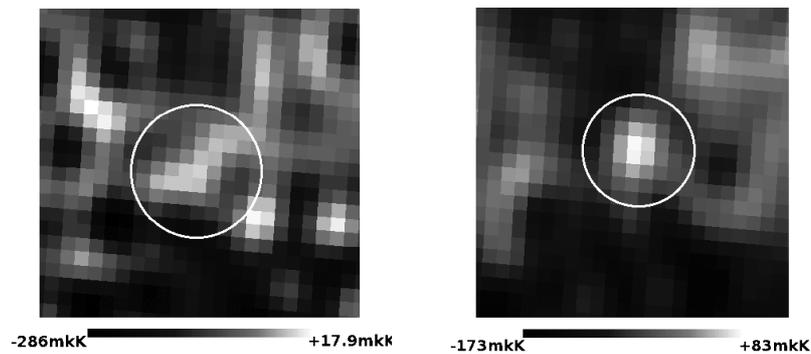


Рис. 2.4: Область, центрированная на радиогалактику J010725.4+322439, на картах космической миссии Планк с источником. Слева: наблюдательные данные на частоте 100 ГГц. Справа: данные космического микроволнового фона. Размер площадки — $30' \times 30'$. По оси абсцисс — прямое восхождение, по оси ординат — склонение. Положение радиогалактики отмечено кружком. Совместный результат диссертанта из работы [A4].

1.74 Мпк, что подтверждает его классификацию как ГРГ.

J065122.5+193713. Радиогалактика с вытянутыми в одном направлении (на северо-восток в экваториальной системе координат) протяженными радиокомпонентами, в начале которых имеются горячие пятна. Структура объекта является характерной для источников движущихся в газе скопления галактик. Отождествляется с источником 2MASX J06513590+1935513 ($V=15^m5$), находящемся в центре тяжести между горячими пятнами. На расстоянии $10'$ к юго-востоку располагается двойной источник J065109.6+192852/J065112.1+192616 с протяженными компонентами, направленными в противоположную, чем компоненты у J065122.5+193713, сторону.

J115909.1+582041. Радиогалактика типа FR II слабовыраженной гантелевидной формы. В противоположных направлениях от радиокомпонентов отходят слабые структуры, что может говорить о вращении ядра радиогалактики. Вероятное отождествление — CGCG 292-05 ($B=15^m7$).

J154901.7-321747. Радиогалактика типа FR II имеет типичную для своего класса гантелевидную форму, за исключением наличия еще одной меньшей протяженной структуры, пересекающей под углом центр и с убывающим распределением радияркости как с FR I. Можно ее отнести к отдельному типу 'X'. Каталогизирован как PKS 1545-321. По результатам отождествления объект имеет линейный размер ~ 1.11 Мпк, что подтверждает его классификацию как ГРГ.

J210138.4-280158. Радиоисточник типа FR I с сильно изогнутой структурой в радиодиапазоне с двумя выделяющимися пятнами, расположенными от центра симметрично друг напротив друга. Имеет характерную спиралевидную S-форму. Каталогизирован как PKS 2058-282. Отождествляется с NGC 6998 (видимая величина 14^m2). По результатам отождествления объект имеет линейный размер ~ 310 кпк, что исключает его из списка ГРГ.

2.3 Заключение по галактикам с признаками слияния

В главе приведены результаты поиска и отождествления 8 радиогалактик с признаками взаимодействия из списка кандидатов в гигантские радиогалактики. Кандидаты были выделены методом сопоставления осей компонентов “несвязанных” радиоисточников каталога NVSS с разделением более $4'$ [29]. Для этого исследования мы отобрали объекты, имеющие сложную морфологию. Среди них — четыре объекта, которые могут быть классифицированы S-радиогалактики (самые характерные формы у J010725.4+322439 и J210138.4-280158). Три радиоисточника: J015756.3+020950, J031821.9+682932 и J154901.7-321747 классифицированы как X-радиогалактики, представляющие довольно малочисленную, но интересную группу радиоисточников с гипотетически возможным быстрым изменением оси вращения центральной объекта после слияния родительских галактик и их ядер. Один из двойных радиоисточников (J065122.5+193713) имеет структуру с со-

направленными протяженными компонентами, говорящими о возможном обдувании радиоисточника газом скопления. Отождествление проведено в оптическом, инфракрасном и субмиллиметровом диапазонах. Отклик от родительских галактик двух радиообъектов наблюдается на картах микроволнового фона, внося дополнительный сигнал в эти данные.

Практически у всех радиогалактик наблюдается крутой непрерывный спектр, построенный по интегральным данным в большом диапазоне радиочастот. Две из исследованных радиогалактик (J005744.4+302156 и J010725.4+322439) определяются на картах микроволнового фона на 100 ГГц, причем J010725.4+322439 не только на картах канала с исходными данными, но и на карте очищенного реликтового излучения. Для двух источников (J031821.9+682932 и J154901.7-321747) подтверждена их принадлежность к классу гигантских радиогалактик, имеющих линейный размер > 1 Мпк.

Обнаружение S- и X-галактик по описанному в предыдущей главе методу сопоставления осей продемонстрировало новые возможности поиска объектов с признаками взаимодействия. Развитие методики и включение в процедуру поиска с учетом дополнительной оси может помочь в выделении новых объектов такого типа.

Глава 3

Сравнение свойств радиогалактик разных популяций по микроволновым данным миссии Planck

3.1 Описание метода

Открытый доступ к многочастотным картам космической миссии Planck¹ [78] позволяет провести разнообразные исследования статистических свойств объектов различных популяций космических объектов. Среди важных выигрышных характеристик Planck ESA по сравнению с предыдущей космической миссией WMAP NASA можно отметить более высокое разрешение (в 3 раза), более высокую чувствительность (в 10 раз) и 9 частотных полос, позволивших разделить компоненты излучения. Все это позволяет изучать более слабые объекты по сравнению с доступными в данных обсерватории WMAP.

Одним из методов, широко применяющихся для анализа популяций слабых радиоисточников, является осреднение площадок вокруг объектов исследуемой выборки в заданном диапазоне длин волн [144, 145, 146, 147]. Такая процедура осреднения разных областей неба получила название стэкинг ('stacking'). Если статистические свойства сигнала в поле источника отличаются от ожидаемого распределения для большинства объектов выборки, как в случае присутствия положительного (для радиоисточника) или отрицательного (при наличии СЗ-эффекта) источника, то осреднение позволяет выявить общее поведение искомого сигнала на фоне шума. Например, на картах реликтового излучения (Cosmic Microwave Background — CMB) неслучайные источники приводят к изменению распределения пиков космологического шума, которые при таком осреднении подавляются, в то время как сигнал самих источников усиливается по отношению к фону [99, 100, 101].

Особый интерес для изучения в микроволновом диапазоне с помощью стэкинга представляют гигантские эллиптические (gE) галактики. Они интересны тем, что 1) являются,

¹<http://www.rssd.esa.int/Planck/>

скорее всего, результатом слияния (мерджинга) галактик в скоплениях галактик, указывая тем самым направление на сгущивание материи в крупномасштабной структуре, что отражается в микроволновом фоне посредством эффекта Сюняева-Зельдовича [80]; 2) они являются родительскими галактиками для радиоисточников, тем самым давая возможность наблюдателю отбирать кандидатов в далекие ($z > 1$) скопления по радиоизлучению [148]; 3) в случае регистрируемого радиоисточника они наблюдаемы на больших красных смещениях ($z > 2$), что, в свою очередь, обусловлено присутствием в их центре СМЧД [149, 150, 151, 152]; 4) родительские gE-галактики с большим содержанием пыли видны в микроволновом диапазоне из-за присутствия мощной тепловой компоненты в распределении энергии в спектре [109]; 5) как сами массивные gE-галактики, так и скопления, в которых они находятся, создают усиливающий эффект гравитационного линзирования, который позволяет отбирать далекие объекты из их окружения в микроволновом диапазоне [112]; 5) в их окружении на больших z в субмиллиметровом диапазоне наблюдаются далекие галактики со вспышкой звездообразования [112]; 6) короткие гамма-всплески, обусловленные слиянием проэволюционировавших массивных звезд [153, 154], происходят в основном в старых звездных системах; 7) кроме того, они сами могут приводить к СЗ-эффекту, обусловленному взаимодействием фотонов СМВ с горячими электронами, присутствующими в окружении массивной gE-галактики [155].

В предлагаемой главе мы исследуем свойства популяции gE-галактик, являющихся родительскими для гигантских радиогалактик (ГРГ), в микроволновом диапазоне, а также сравниваем их с популяциями gE, связанными с другими классами объектов. Для этой цели мы проводим стэкинг площадок, вырезанных из карт микроволнового фона, полученных в космической миссии Planck, в окрестности ГРГ и других выборок источников. В анализе мы используем выборку ГРГ, впервые подготовленную из известных на данный момент ГРГ (см. раздел 3.2.1), выборку радиоисточников обзора WENSS [49] в диапазоне прямых восхождений $0^h \leq R.A. < 2^h$, выборку далеких радиогалактик с красными смещениями $z > 0.3$ [106, 107, 108], список гигантских эллиптических галактик из работы [156], а также выборки гамма-событий из каталогов BATSE [157] и ВерроSAX [158], которые применялись в сравнительном анализе.

Сначала описываются выборки радиогалактик и объектов, которые могут быть связаны с эллиптическими галактиками, например, гамма-всплески (GRB). В разделе также представлен каталог ГРГ, скомпилированный по данным разных работ, который используется для изучения популяции этих объектов. Для подготовленных списков строятся и анализируются средние изображения, выделенные из карт СМВ Planck из многочастотных карт наблюдений миссии. Исследуются топологические свойства средних изображений и средние спектры разных популяций. В Заключении обсуждаются основные результаты проделанной работы.

3.2 Выборки

Используемые выборки объектов, родительские галактики которых связываются с гигантскими эллиптическими галактиками, разнообразны как по принципу объединения в одну группу, так и по объему. Тем не менее, даже минимальные выборки: гигантские эллиптические галактики в скоплениях (25 шт.) и радиоисточники обзора WENSS в диапазоне прямых восхождений $RA < 2h$ с радиоспектральными индексами $\alpha \geq 0$ (19 шт.), позволяют уменьшить гауссовый шум на средней площадке более чем в 4 раза и изучить топологические свойства СМВ (наличие минимумов и максимумов) в окрестности среднего объекта популяции внутри области радиусом $7'$, соответствующего ~ 1.5 диаграммы направленности антенны обсерватории Planck на высоких частотах. Ниже мы опишем используемые выборки, включающие отобранные объекты по радиоморфологии, радиоспектральному индексу, удаленности от наблюдателя, нахождению в скоплении и возможной связи с гамма-всплесками.

3.2.1 Гигантские радиогалактики

Выборка гигантских радиогалактик (ГРГ), где собраны все доступные из литературы объекты с установленными линейными размерами $B > 1$ Мпк и угловыми размерами $\theta > 4'$, представлена в Таблице 3.1.

Таблица 3.1: Список гигантских радиогалактик, используемых в осреднении процедурой `stacking`. Значения в скобках в столбце красных смещений — фотометрические оценки из работы [20].

name	FR type	size, Мпк	z	reference
J000332+035114	II	2.08	0.097	[160]
J003406-663935	II	2.0	0.1103	[206, 207]
J004817-830842	II	1.34	0.2591	[15]
J005332+403059	II	1.52	0.1488	[29, 11]
J011204+493004(3C35)	II	1.1	0.0670	[29, 11]
J011625-472218	II	1.5	0.1461	[207]
J013936+395712(4C39.04)	II	1.6	0.2107	[11, 11, 224, 176, 177, 208]
J014345-543029	II	1.0	0.1791	[15]
J020033+404912(4C40.09)	I/II	1.9	0.0827	[11]
J021309-474356(PKS 0211-47)	II	1.6	0.2200	[209]
J021419+325114	II	1.6	0.2605	[11]
J023714-643006	II	2.2	0.364:	[15]
J031305+412001	II	1.8	0.1340	[11]

J031822+682932	II	1.74	0.0901	[29, 224, 210]
J032037-451937	II	1.3	0.9792	[207, 224, 211, 212]
J032555-773006	II	1.7	0.2771	[15]
J033143-771552	II	2.7	0.1456	[15, 206, 207]
J042218+151239	I	3.98	0.409	[160]
J043911-242215	II	1.1	0.8340	[224]
J045258+520429(3C130)	I	1.1	0.1090	[176, 213]
J045908-525208	II	1.1	0.0957	[206, 207]
J050542-284017		2.5	0.0383	[207, 214, 215]
J051332-302850		1.2	0.0576	[206, 207]
J063143-540730	II	1.0	0.2036	[15]
J063634-203530(PKS 0634-20)	II	1.2	0.0552	[209, 216]
J065434+732036	II	1.9	0.1145	[11]
J070202+485922	I/II	1.9	0.0650	[11]
J070531-451312		1.1	0.1242	[206, 207]
J070922-360134		1.0	0.1109	[207]
J072018+283754	II	1.5	0.2705	[225, 217]
J072519+302545	II	1.2	(0.70)	[225]
J074844+554911(DA240)	I/II	2.0	0.0240	[11]
J081105-680029	II	1.3	0.2311	[15]
J081637+334754	II	1.2	(0.42)	[225]
J082003+753837	II	2.3	0.2374	[11, 224]
J082606+691955(8C 0821+695)	II	3.0	0.5380	[11, 224]
J091252+350929	II	1.58	0.2489	[29, 225, 176, 177, 217]
J092753+351053	II	2.2	(0.55)	[225]
J095014+731533(4C73.08)	II	1.5	0.0581	[11]
J100604+345427(3C236)	II	5.7	0.1005	[11, 224]
J101114+311118	II	1.7	(0.50)	[225]
J102756-231202	II	1.1	0.3090	[224]
J103309+564420(HB 13)	I	2.6	0.0450	[11]
J115549+402905	II	1.4	(0.53)	[225]
J121159+741925(4CT74.17)	II	1.2	0.107	[11, 224]
J121611+415938	II	1.6	0.2426	[177, 11]
J123530+212052(3C274.1)	II	1.0	0.4220	[224]
J125311+404118	II	1.0	0.2302	[225, 217]
J125435+293406	II	1.6	(0.42)	[225]
J125913-773706	II	1.5	>0.3	[15]
J130459-324914		1.3	0.1528	[206, 207]
J131146+405853	II	1.0	0.0358	[11]

J131406+693657(DA340)	II	1.3	0.1060	[11, 224]
J133035+385018	II	1.9	0.63?	[225, 217]
J133612-801818	II	2.3	0.2478	[15]
J134302+375834	II	3.1	0.2267	[225, 224, 176, 177]
J135047+642916(3C292)	II	1.1	0.7100	[224]
J135520+292354	II	1.5	(0.43)	[225]
J140044+301806	II	2.6	0.206	[11, 224, 176, 177, 213, 218]
J142027-054642	II	4.7	0.3067	[219]
J142817+291808	II	1.9	0.0870	[225, 11]
J142849+393853	II	1.6	(0.50)	[225]
J144529+305142	II	1.7	0.42	[225, 217]
J145133+335806	II	1.1	0.3251	[225, 217]
J145306+330827	II	1.7	0.249	[225, 11, 176, 177, 217]
J144851-400806	II	1.5	0.123	[220]
J151331+384130	II	1.7	0.52?	[225, 217]
J152503+334606	II	1.3	(0.47)	[225]
J153709+842253	II	2.1	0.201	[11, 224]
J154902-321747	I/II	1.11	0.1081	[29, 207]
J155212+200512(3C326)	II	2.5	0.0895	[176, 177, 224]
J155429+394506	II	1.1	(0.35)	[225]
J155504+365306	II	1.3	0.2472	[225, 217]
J160421+373106	II	1.3	0.814	[225, 217]
J162811+514656	II	1.6	0.0547	[11, 221]
J163120+823404(NGC 6251)	I/II	3.0	0.0247	[11]
J164908+311406	II	1.2	0.4373	[225, 217]
J171225+355830	II	1.0	0.3357	[225, 217]
J172515+392330	II	1.2	0.2898	[225]
J172834-723730	II	2.2	0.4735	[15]
J174840-233542	II	1.4	0.24	[222]
J183514+620421	II	1.1	0.518	[223]
J191054-704918	I	1.2	0.2172	[15]
J191921-795942	II	1.8	0.3462	[15]
J194709-822254	II	2.1	0.333:	[15]
J204244+750812(4C74.26)	II	1.6	0.1040	[11, 224, 213]
J214535+815523	II	3.7	0.1457	[11]
J215909-721830	II	1.0	0.0974	[15, 206, 207]
J231600-282359	II	2.2	0.2293	[29, 30]

3.2.2 Выборки сравнения

Первая выборка сравнения сформирована из радиоисточников обзора WENSS [49], отобранных в диапазоне прямых восхождений $0^h \leq R.A. < 2^h$, которые ранее исследовались в микроволновом диапазоне [205]. Обзор WENSS (The Westerbork Northern Sky Survey) [49] проведен на частоте 325 MHz и имеет предельное значение спектральной плотности потока на уровне около 18 мЯн ($\sim 5\sigma$) с разрешением $54'' \times 54'' \operatorname{cosec}(\delta)$. Он покрывает Северную часть неба выше 29° по склонению. С использованием базы данных CATS [32, 33] были проведены отождествления источников из первых двух часов по прямому восхождению, аппроксимация радиоспектров в процедуре `spg` [41] пакета FADPS [34, 65] и отбор источников с линейными спектрами. Последние были разбиты на подвыборки, содержащие объекты с различными радиоспектральными индексами α ($S \sim \nu^{-\alpha}$): $\alpha < -1.1$; $-1.1 \leq \alpha < -0.75$; $-0.75 \leq \alpha < -0.5$; $-0.5 \leq \alpha < 0$ и $\alpha \geq 0$.

Следующая выборка объектов для сравнения популяций представляет собой список далеких ($z > 0.3$) радиогалактик и описана в работах [106, 107, 108]. Кроме того, ранее список уже использовался в исследованиях данных микроволнового фона, в частности, для поиска крупномасштабных течений вещества [161]. Радиоисточники выборки принадлежат популяции галактик самой высокой светимости, что делает возможным изучать их на больших красных смещениях и тем самым использовать как зонды состояния Вселенной в другие космологические эпохи. Чрезвычайно важным моментом при исследовании этих источников может считаться наиболее вероятная гипотеза, что для большей части далеких мощных радиоисточников родительскими галактиками являются гигантские эллиптические галактики (gE), которые на начальном этапе селекции могли бы использоваться как стандартные свечи, линейки и часы. В пользу гипотезы об gE как родительских галактик для большинства далеких мощных радиогалактик говорят и их радиояркость, связанная с присутствием сверхмассивной черной дыры, являющейся триггером активности, и оптические данные, с использованием которых строится диаграмма Хаббла ‘K–z’, подтверждающая наличие типичного для gE звездного населения в ранние космологические эпохи [162, 163]. Отождествление далеких радиогалактик с gE также важно и при прослеживании эволюции звездных систем на больших красных смещениях, и при поиске далеких групп галактик или протоскоплений, в центре которых они находятся, и при исследовании процессов слияния и взаимодействия, на которые может указывать проявляющаяся активность их ядер. Каталог радиогалактик [106] содержит 2442 источника со спектроскопическими красными смещениями, фотометрическими величинами и плотностями потоков в радиодиапазоне, размерами радиоисточников, именами исходных каталогов, координатами, а также радиоспектральными индексами, которые вычислялись по результатам кросс-идентификации с радиокаталогами, хранящимися в базе данных CATS² [32]. Основные параметры входящих в каталог объектов: красное смещение $z > 0.3$ и мор-

²<http://cats.sao.ru>

фологические свойства радиогалактики. Он в основном очищен от объектов с красными смещениями, определяемыми фотометрическим методом, и со свойствами квазаров по имеющимся данным литературы. Несмотря на то, что в каталоге радиогалактик не исключено присутствие объектов с другими классификационными признаками, явление AGN наблюдается в областях с повышенной плотностью материи — в группах и скоплениях галактик, так что в данной работе достаточен сам факт наличия радиоисточника в данной области. Стоит отметить, что в каталог отобранных галактик включены также объекты из других списков, в том числе источники с ультракрутыми спектрами ($\alpha < -1.0$). Именно среди таких объектов высок процент далеких радиогалактик [164, 165, 89, 90, 166, 167]. Самые далекие радиогалактики с красным смещением $z > 4.5$: $z = 5.199$ [168] и с $z = 4.514$ [169, 170] были открыты с помощью этого критерия. Выборку далеких радиогалактик мы разбили на подвыборки, содержащие источники из разных диапазонов красных смещений: $0.3 \leq z < 0.7$, $0.7 \leq z < 1.0$, $1.0 \leq z < 1.5$, $1.5 \leq z < 2.0$, $2.0 \leq z < 2.5$ и $z \geq 2.5$.

Гигантские эллиптические галактики из списка скоплений [156] легли в основу выборки, которая ранее уже использовалась как дополнительная при исследовании радиогалактик [171]. Наша выборка состоит из 25 галактик типа gE (и cD), которые отобраны как центральные галактики скоплений и для которых имеются данные из оптического и близкого инфракрасного диапазона (в исходном полном списке 45 скоплений). Отобранные объекты списка [171] использовались в данной работе. Красные смещения скоплений галактик лежат в диапазоне $0.1 < z < 1.3$.

Для сравнительного анализа также были использованы объекты из списков GRB космических обсерваторий BATSE [157] и ВерроSAX [158], отклик СМВ и результаты стэкинга для которых исследовались в работах [172, 173]. При изучении среднего сигнала СМВ в направлении на GRB было обнаружено, что имеется незначительное различие на уровне $|S/N| > 1.4$, что может случайно выпадать в $\lesssim 20\%$ случаев для гауссовых шумов, в распределении среднего сигнала микроволнового фона в направлении на гамма-всплески. При этом короткие ($t < 2$ сек) всплески на осредненной площадке попадают в локальный минимум фона, а длинные ($t > 2$ сек) — в локальный максимум. Если следовать предположению, что короткие GRB, гипотетически связанные со слиянием нейтронных звезд, возникают в старых эллиптических галактиках, образованных за счет мерджинга менее массивных галактик и расположенных в скоплениях галактик, то локальный минимум может быть обусловлен эффектом Сюняева-Зельдовича [80]. Для длинных всплесков попадание в локальный максимум распределения фона, вероятно, может быть связано с другим эффектом. Если длинные всплески связаны со вспышками сверхновых, т.е. галактиками со звездообразованием, то, даже несмотря на расположение в скоплении галактик, собственное излучение галактик, содержащих пыль и газ, в микроволновом диапазоне будет преобладать над эффектами окружения и приводить к появлению локального максимума на картах СМВ. Следуя примененной методике разделения выборок GRB на короткие и длинные события, в данной работе мы разделили выборки списков BATSE и ВерроSAX

Таблица 3.2: Параметры выборок, используемых в исследовании.

Каталог	Параметры селекции	Объем выборки	Средний сигнал CMB, K	Разброс K
GRG mixed cluster list	$\theta > 4'$ gE,cD-RG, $0.1 < z < 1.3$	89	-9.71e-06	6.5e-06
WENSS, RA<2h	$\alpha < -1.1$	224	4.36e-05	5.2e-06
WENSS, RA<2h	$-1.1 \leq \alpha < -0.75$	661	3.54e-05	2.7e-06
WENSS, RA<2h	$-0.75 \leq \alpha < -0.5$	497	3.85e-05	3.0e-06
WENSS, RA<2h	$-0.5 \leq \alpha < 0$	238	3.57e-05	4.0e-06
WENSS, RA<2h	$\alpha \geq 0$	19	5.12e-05	1.3e-05
Distant RG	$0.3 \leq z < 0.7$	1797	3.58e-06	2.3e-06
Distant RG	$0.7 \leq z < 1.0$	205	5.02e-06	4.0e-06
Distant RG	$1.0 \leq z < 1.5$	149	9.34e-06	3.6e-06
Distant RG	$1.5 \leq z < 2.0$	103	shifted min	1.2e-05
Distant RG	$2.0 \leq z < 2.5$	77	7.22e-06	4.7e-06
Distant RG	$z \geq 2.5$	81	8.98e-06	6.0e-06
BATSE	$t < 2s$	495	2.60e-06	2.3e-06
BATSE	$t \geq 2s$	1540	shifted min	1.9e-06
BeppoSAX	$t < 2s$	87	-1.24e-05	4.9e-06
BeppoSAX	$t \geq 2s$	694	shifted max	3.4e-06

таким же образом.

3.3 Средний популяционный микроволновой сигнал

При анализе среднего сигнала популяции объектов каждой из подвыборок использовались многочастотные карты архива космической миссии Planck [78], а также карта CMB SMICA, построенная методом разделения компонент многочастотного сигнала [110]. Из архивных карт Planck с помощью процедуры 'marcut' пакета GLESP³ [66] в окрестности радиоисточников выделялись области размером $1^\circ \times 1^\circ$. Сигнал для дальнейшего анализа в выделенных площадках сохранялся в виде файлов в формате FITS Basic [104]. Осреднение полей проводилось с помощью процедуры 'difmap' пакета GLESP. В процедуре стэкинга применялось попиксельное колоночное осреднение выбранных площадок неба одинакового углового размера. Выбранные области анализировались пакетом SExtractor [103], что включало определение интегральной яркости центральных объектов и дисперсии сигнала.

Изучение и сравнение подвыборок объектов разных популяций проведено по двум на-

³<http://www.glesp.nbi.dk>

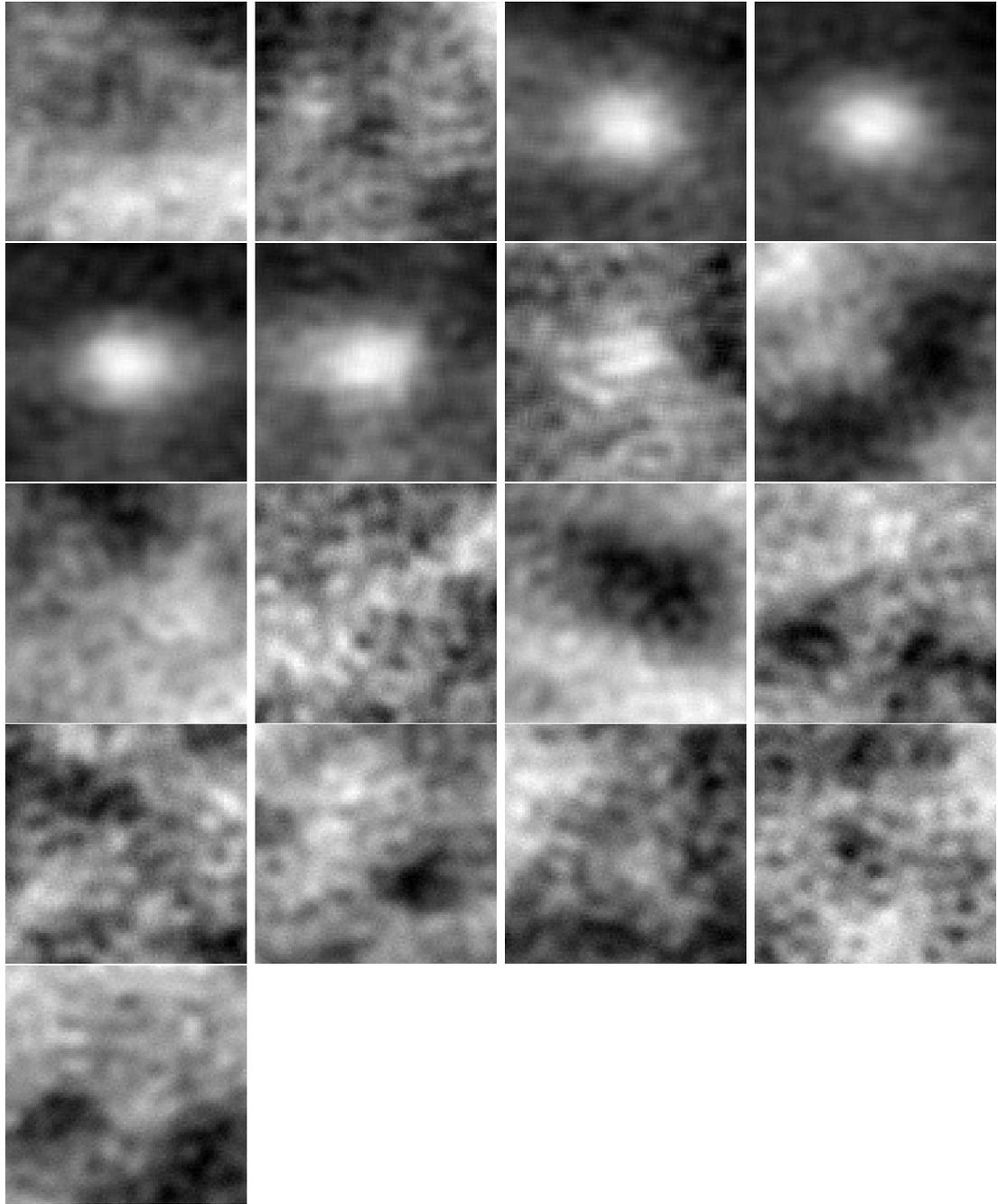


Рис. 3.1: Зоны стэкинга размером $1^\circ \times 1^\circ$, построенные по данным карты CMB SMICA Planck 2.02. Слева направо сверху вниз изображения средних карт для популяций объектов: **(1)** ГРГ с угловыми размерами $\theta > 4'$ и линейными >1 Мpc (89 шт.), **(2)** галактики типов gE и CD (25 шт.), **(3)** радиоисточники (RS) обзора WENSS со спектральными индексами $\alpha < -1.1$ (224 шт.), **(4)** WENSS RS с $-1.1 \leq \alpha < -0.75$ (661 шт.), **(5)** WENSS RS с $-0.75 \leq \alpha < -0.5$ (497 шт.), **(6)** WENSS RS с $-0.5 \leq \alpha < 0$ (238 шт.), **(7)** WENSS RS с $\alpha \geq 0$ (19 шт.), **(8)** далекие RG с красными смещениями $0.3 \leq z < 0.7$ (1797 шт.), **(9)** HZRG с $0.7 \leq z < 1.0$ (205 шт.), **(10)** HZRG с $1.0 \leq z < 1.5$ (149 шт.), **(11)** HZRG с $1.5 \leq z < 2.0$ (103 шт.), **(12)** HZRG с $2.0 \leq z < 2.5$ (77 шт.), **(13)** HZRG с $z \geq 2.5$ (81 шт.), **(14)** события BATSE длительностью $t < 2s$ (495 шт.), **(15)** BATSE, $t > 2s$ (1540 шт.), **(16)** ВерроSAX, $t < 2s$ (87 шт.), **(17)** ВерроSAX, $t > 2s$ (694 шт.). Исходные данные CMB приведены термодинамической температуре. Совместный результат диссертанта из работы [A7].

правлениям: исследования среднего сигнала по данным карты CMB Planck и среднего спектра по данным измерения термодинамической температуры на различных частотах. Параметры выборок, используемых в исследовании, приведены в Таблице 3.2, где также указан средний детектируемый сигнал в окрестности радиусом $7'$ и его отклонения в области стэкинга. Изображения средних областей вокруг объектов разных популяций, рассчитанных по данным карты CMB SMICA, показаны на Рис. 3.1. Средний сигнал CMB в области ГРГ демонстрирует сложную топологию, включающую локальный максимум на уровне шумов в области более глубокого (детектируемого) минимума (Таблица 3.2). Отметим, что шумовой сигнал на изображениях — это средний космологический шум, построенный по данным флуктуаций CMB. На эти флуктуации накладывается дополнительный сигнал вторичной анизотропии, связанный с присутствием радиосточников разной природы и СЗ-сигнала от скоплений галактик. Если вторичная анизотропия, привносимая поздними источниками ($z < 9$) не случайна, то мы можем использовать форму (топологию) сигнала как характеристику среднего популяционного источника.

На Рис. 3.2, 3.3, 3.4 и 3.5 приведены спектры объектов по данным осреднения областей вокруг них из разных популяций радиоисточников и гигантских эллиптических галактик в микроволновом диапазоне по многочастотным данным Planck. На каждом из рисунков для сравнения приведены распределения энергии для гигантских радиогалактик. Для данных ГРГ на частотах выше 217 ГГц отсутствует значимый для детектирования сигнал в окрестности положения галактики. Сравнение спектров средней популяционной ГРГ с микроволновыми данными для радиоисточников WENSS показывает существенное отличие распределения энергии в спектрах в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах (Рис. 3.2). Спектр средней ГРГ плоский, в то время как средних источников обзора WENSS он растет с частотой в рассматриваемом диапазоне. Такое поведение популяционных радиоисточников уже было отмечено ранее в работах [99, 100, 101] и связывалось с влиянием пылевой компоненты излучения родительских галактик. Заметим, что сильный подъем участка спектра на высоких частотах $\nu > 500$ ГГц (Рис. 3.2) отражает не физический процесс, а переход в другие единицы (а именно, $\text{Ян}\cdot\text{ср}^{-1}$) в отличие от термодинамической температуры T_{CMB} на более низких частотах. В данном случае условность спектра не так важна, как его форма (топология), которая отражает реальный рост плотности потока с увеличением частоты, что показано в работах [100, 101]. Отсутствие высокочастотного сигнала для средней ГРГ говорит в пользу меньшей запыленности родительской галактики и о возможной связи размера радиоисточника и плотности пылевой компоненты в области центральной машины. Отметим, что зоны средних объектов выборок из WENSS обращают на себя внимание яркостью источников на средней карте CMB. Этот факт связан с двумя проявившимися эффектами: большим числом осредняемых объектов (и увеличением отношения сигнал/шум) и присутствием множества ярких радиоисточников в каждой подвыборке WENSS. Вторым эффектом эти подвыборки отличаются от списков далеких радиогалактики, где ярких радиоисточников мало. Не экранированные масками яркие

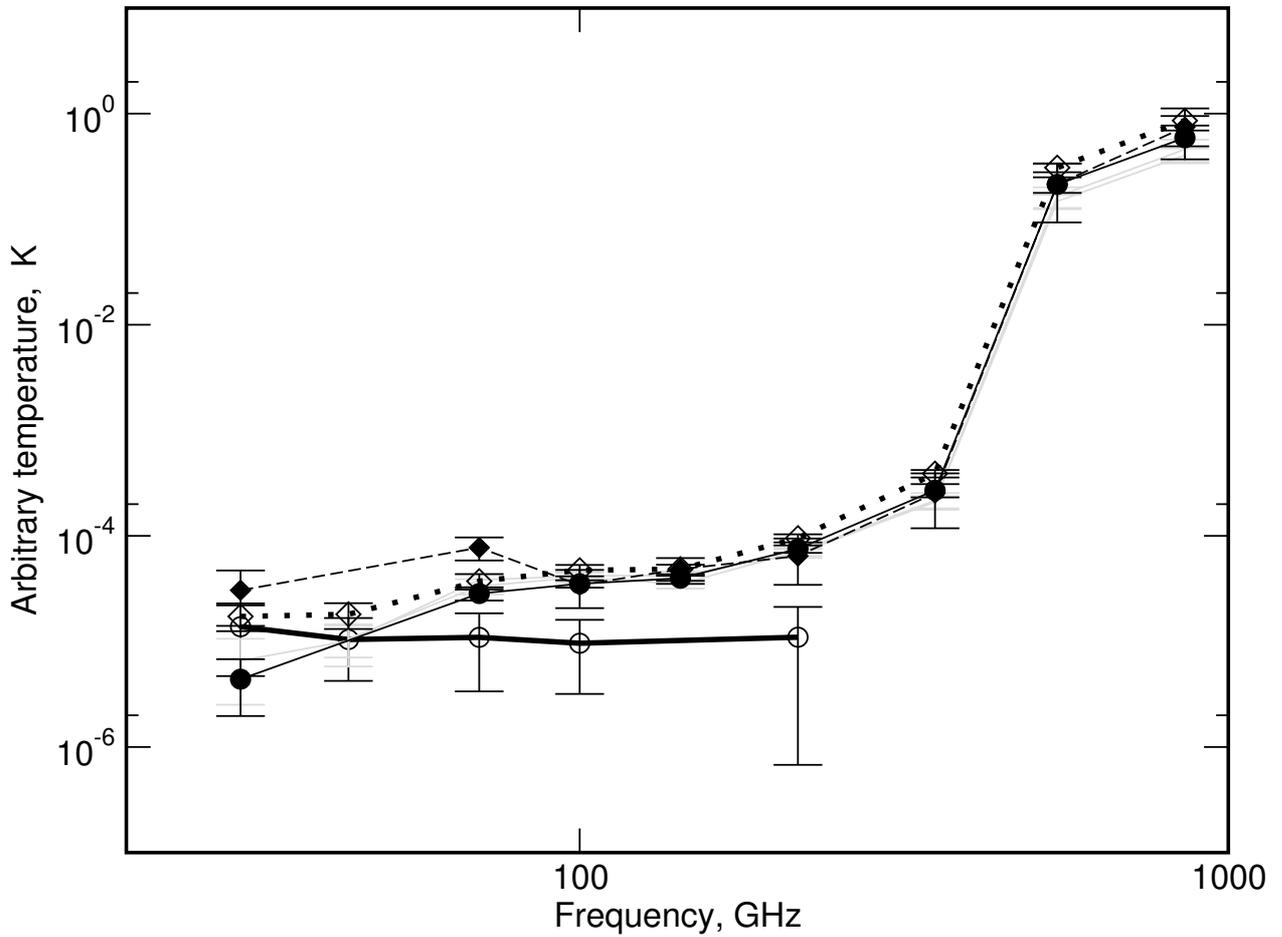


Рис. 3.2: Распределение энергии в спектре, представленной в термодинамической температуре $T_{\text{СМВ}}, \text{K}$ для $\nu < 500 \text{ ГГц}$ и $\text{Ян} \cdot \text{ср}^{-1}$ для $\nu > 500 \text{ ГГц}$, по данным осреднения областей вокруг радиоисточников каталога WENSS из диапазона прямых восхождений $0^h \leq RA < 2^h$ на многочастотных картах наблюдений Planck. Пустыми кружками и толстой черной сплошной линией показаны измерения температуры микроволновых карт Planck в направлении на ГРГ. Заполненные ромбики и штриховая линия соответствуют областям вокруг радиоисточников с инвертированными спектрами ($\alpha > 0$). Заполненными кружками и тонкой сплошной линией отмечены данные по осреднению полей вокруг объектов с $-1.1 \leq \alpha < -0.75$. Пустые ромбики и пунктирная линия отмечают данные для источников с ультракрасными спектрами ($\alpha < -1.1$). Между последними двумя распределениями лежат спектры для средних объектов из популяций с $-0.75 \leq \alpha < -0.5$ и $-0.5 \leq \alpha < 0$. Совместный результат диссертанта из работы [A7].

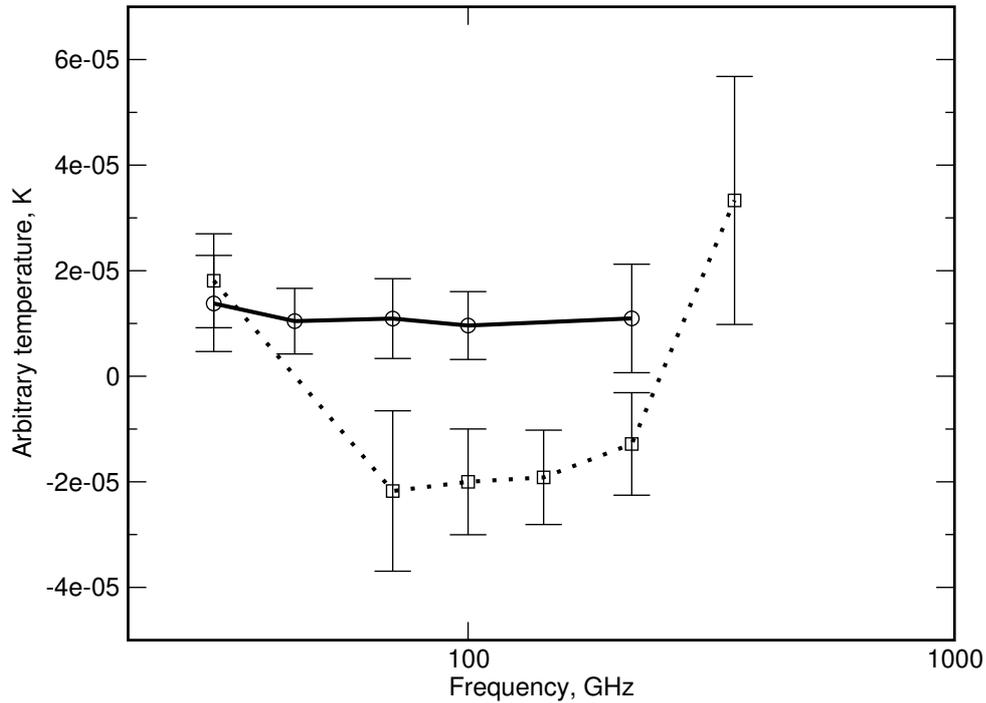


Рис. 3.3: Распределение энергии в спектре, представленной в термодинамической температуре, по данным осреднения областей вокруг гигантских эллиптических галактик типов gE и cD. Показано пустыми квадратами и пунктирной линией. Пустыми кружками и толстой черной сплошной линией показаны измерения температуры микроволновых карт Planck в направлении на ГРГ. Совместный результат диссертанта из работы [A7].

источники WENSS прошли через процедуру разделения компонент при восстановлении карты CMB, и их остаточное излучение наблюдается на этой карте.

Существенное отличие между популяциями в микроволновом диапазоне наблюдается при сравнении данных для средней ГРГ и среднего отклика от гигантских эллиптических галактик. В последнем случае в спектре доминирует сигнал, обусловленный эффектом Сюняева-Зельдовича [80]. Если в области средней ГРГ присутствует слабый положительный сигнал, то для гигантских эллиптических галактик в миллиметровом диапазоне доминирует отрицательный сигнал, переходящий в положительный на частоте 217 ГГц. Отметим, что СЗ-сигнал от средней ГРГ, предсказываемый в работе [120] в предположении действия обратного комптоновского эффекта при рассеянии CMB на электронах плазмы ГРГ, не наблюдается. Однако в области ГРГ на среднем снимке CMB имеется зона с понижением яркости (Рис. 3.1, картинка в левом верхнем углу) со слабым источником в центре. Это могло бы говорить о том, что СЗ-сигнал подавляется собственным излучением ГРГ,

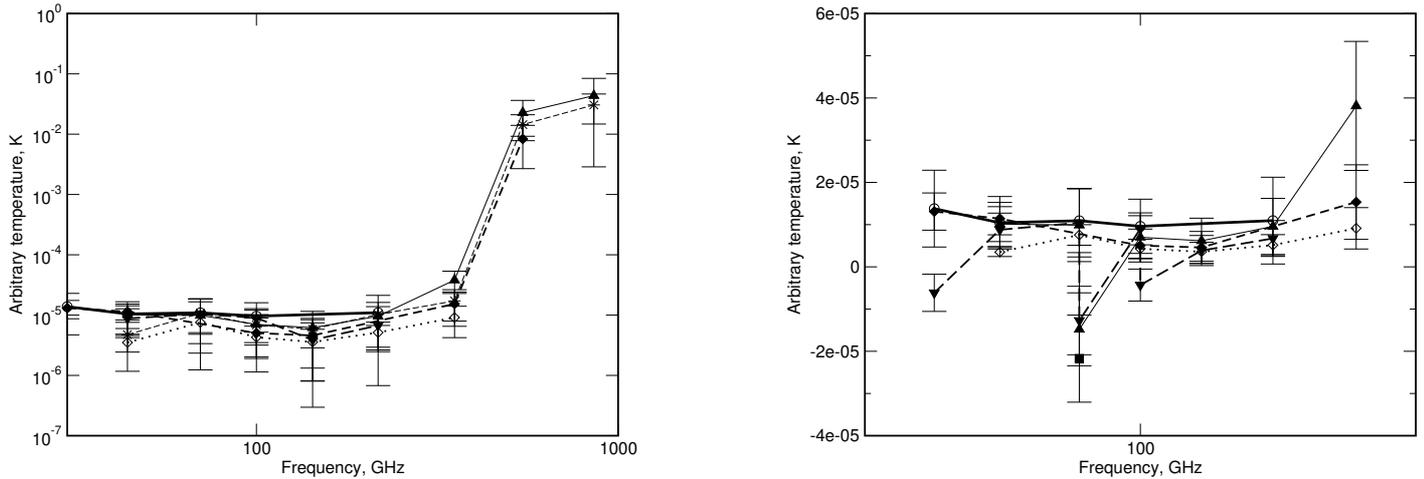


Рис. 3.4: Распределение энергии в спектре, представленной в термодинамической температуре $T_{\text{СМВ}}$, К для $\nu < 500$ ГГц и $\text{Ян}\cdot\text{ср}^{-1}$ для $\nu > 500$ ГГц, по данным усреднения областей вокруг далеких радиогалактик на многочастотных картах наблюдений Planck. Пустыми кружками и толстой черной сплошной линией показаны измерения температуры микроволновых карт Planck в направлении на ГРГ. Слева распределение энергии в спектре среднего объекта по данным карт Planck в области далеких радиогалактик с удалением отрицательного среднего сигнала и включением данных по высоким частотам (545 и 857 ГГц). Справа распределение энергии в спектре среднего объекта по данным карт Planck в области далеких радиогалактик с учетом отрицательного среднего сигнала и исключением высоких частот. Шкала по оси абсцисс линейная. Пустыми ромбиками и пунктирной линией отмечены усредненные данные площадок вокруг радиогалактик с красными смещениями из диапазона $0.3 \leq z < 0.7$. Заштрихованные ромбики и штриховая линия соответствуют областям вокруг радиогалактик с $0.7 \leq z < 1.0$. Звездочками и длинной тонкой штриховой линией показаны данные из диапазона $1.0 \leq z < 1.5$. Заштрихованным квадратом отмечен отрицательный сигнал в области 70 ГГц (правый рисунок) для данных с $1.5 \leq z < 2.0$. Заштрихованными верхними треугольниками и длинной штриховой линией показаны данные по радиогалактикам из диапазона $2.0 \leq z < 2.5$, а нижними треугольниками и тонкой сплошной линией - из интервала $2.5 \leq z$. Совместный результат диссертанта из работы [A7].

но при этом ожидаемый положительный пик в субмиллиметровом диапазоне все же не виден. Таким образом, вопрос о присутствии СЗ-эффекта в ГРГ остается открытым.

Сравнение спектров ГРГ с данными по далеким радиогалактикам (HZRG) показывает, что ГРГ близки к последним по наклону спектра в миллиметровом диапазоне (Рис. 3.4) для положительного отклика и отсутствию роста спектра на субмиллиметровом участ-

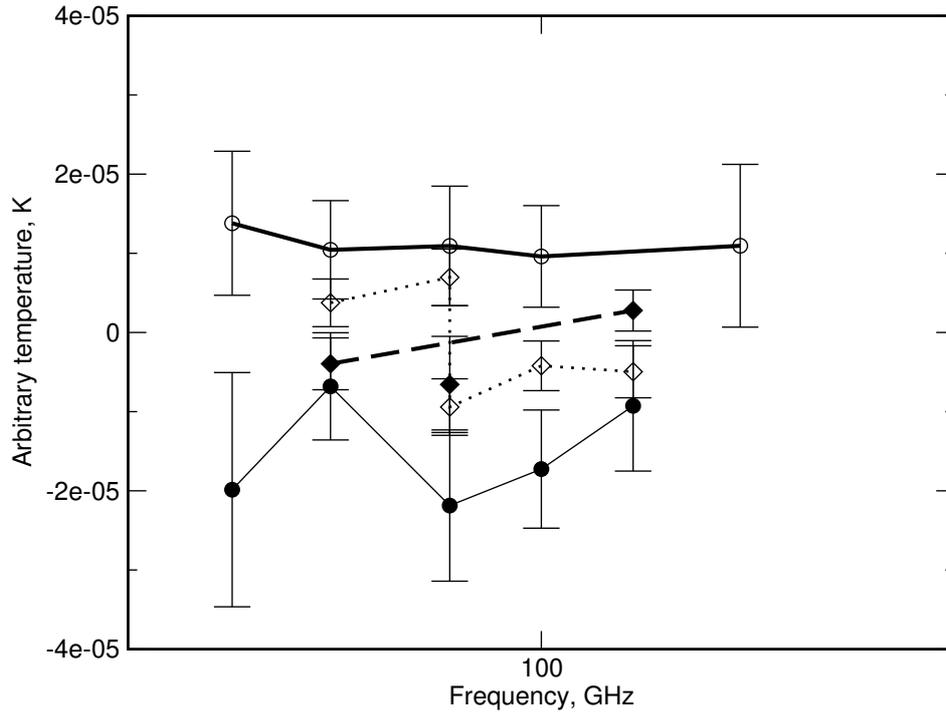


Рис. 3.5: Распределение энергии в спектре, представленной в термодинамической температуре $T_{\text{СМВ}}, \text{K}$, по данным осреднения областей вокруг гамма-всплесков каталогов BATSE и ВерроSAX на многочастотных картах наблюдений Planck. Пустыми кружками и толстой черной сплошной линией показаны измерения температуры микроволновых карт Planck в направлении на ГРГ. Пустыми ромбиками и пунктирной линией отмечены данные по осреднению полей вокруг коротких событий BATSE. Заштрихованные ромбики и штриховая линия соответствуют областям вокруг длинных событий BATSE. Заштрихованные кружки и тонкая черная линия показывают данные коротких событий ВерроSAX, а заштрихованный ромбик — длинных событий ВерроSAX. Совместный результат диссертанта из работы [A7].

ке (последнее — для подвыборок с $0.3 \leq z < 0.7$ и $2 \leq z < 2.5$). Распределение энергии в спектре HZRG до высоких частот с включением отрицательного сигнала, когда в $7'$ -окрестности центра объекта обнаруживаются и минимум, и максимум, позволяет выделить различия в свойствах радиогалактик на различных красных смещениях. Среди особенностей — четкий минимум на частоте 70 ГГц для объектов с красными смещениями из интервала $1.5 \leq z < 2$ и отсутствие значимого сигнала на других частотах, а также наличие отрицательного сигнала на 30, 70 и 100 ГГц для галактик из интервала $2 \leq z < 2.5$. На средних картах СМВ (Рис. 3.1) для первого случая обнаруживается минимум, а во втором случае — слабый локальный максимум на фоне спадающего сигнала СМВ. И для

той, и для другой популяции HZRG можно говорить о возможном влиянии СЗ-эффекта. Отметим, что в эти эпохи: $1.5 \leq z < 2$ и $2 \leq z < 2.5$, происходит формирование скоплений галактик, включающее активный мерджинг, и нельзя исключить, что здесь может наблюдаться эффект Сакса–Вольфа [175], обусловленный влиянием переменного гравитационного потенциала на частоту фотона СМВ, пролетающего через формирующееся скопление.

Сравнение спектра ГРГ с данными GRB говорит о том, что в микроволновом диапазоне эти объекты принадлежат разным популяциям. Причем для коротких GRB наблюдаются свойства, соответствующие СЗ-эффекту: отрицательный сигнал на низких частотах (< 217 ГГц) и его рост на более высоких частотах, что обсуждалось ранее [173].

3.4 Заключение

В главе описано исследование отклика среднего объекта, полученного методом стэкинга площадок размером $1^\circ \times 1^\circ$ вокруг источников разных популяций по данным микроволновых карт миссии Planck. Основная исследуемая популяция объектов — гигантские радиогалактики числом 89 штук с угловыми размерами $> 4'$, линейные размеры которых (> 1 Мпк) подтверждены в литературе, — впервые скомпилированы в данной работе в общий список. Для сравнения свойств ГРГ со свойствами других популяций изучались подвыборки объектов, отобранные по спектральным индексам, красным смещениям, оптической морфологии (галактики типов gE и cD), а также GRB из каталогов BATSE и ВерроSAX.

Для средней ГРГ в микроволновом диапазоне, область вокруг которой построена методом стэкинга, обнаружено:

1. Положительный сигнал в миллиметровом диапазоне, обсуждаемый в [176, 177, 116];
2. Спектр в миллиметровом диапазоне — плоский;
3. Сигнал в субмиллиметровом диапазоне не обнаружен;
4. Топологические свойства на средней карте флуктуаций СМВ имеют особенности: слабый незначимый максимум ($< 1\sigma$) находится в зоне минимума;
5. Не обнаружен значимый СЗ-эффект, связанный с рассеянием фотонов СМВ на электронах плазмы джетов ГРГ [120].

Сравнение с другими популяциями объектов показало, что к наиболее близким к ГРГ по средним микроволновым свойствам можно отнести далекие радиогалактики с красными смещениями из диапазонов $0.3 \leq z < 0.7$ и $2 \leq z < 2.5$.

Отмечено, что, несмотря на схожесть (возможное пересечение) популяций источников, включающих в себя выборки исследуемых объектов, объединенных по разным параметрам: радиоисточники WENSS с разными спектральными индексами и далекие радиогалактики, особенности формы спектров у них различны. Спектр среднего объекта, построенного для популяций источников обзора WENSS, в микроволновом диапазоне растет с ростом частоты (Рис. 3.2), но отличается от обнаруженного ранее поведения термодинамической температуры для RCR-источников [99, 100, 101], где на спектре имеется локальный максимум на частоте 70 ГГц, как у подвыборки объектов WENSS с $\alpha > 0$. Однако, если посмотреть на спектры далеких радиогалактик (Рис. 3.2), то такой максимум наблюдается практически для всех диапазонов z . Существование локального максимума на 70 ГГц, в принципе, может быть объяснено суммарным излучением, производимым различными механизмами в разных диапазонах частот: плоского синхротронного — в низкочастотной части спектра и излучение пылевой компоненты в высокочастотной области. Для выяснения причин появления локального максимума требуется дополнительное исследование индивидуальных источников. Также обнаружен еще один момент, касающийся свойств среднего сигнала СМВ в направлении на далекие радиогалактики (Рис. 3.1): для объектов из диапазонов $1.5 \leq z < 2$ и $2.5 \leq z$ обнаруживается минимум, а для $2 \leq z < 2.5$ — слабый локальный максимум на фоне спадающего сигнала СМВ. Для этих популяций HZRG можно говорить о возможном влиянии СЗ-эффекта.

Глава 4

Модель галактик на сфере

4.1 Введение

Совершенствование и развитие методов моделирования эксперимента, сопровождающих получение новых данных в астрономических наблюдениях с высокой чувствительностью, неизбежно приводит к стандартизации подходов к такому моделированию. Среди используемых решений последнего времени — моделирование распределения космического микроволнового фона (Cosmic Microwave Background — СМВ) на полной сфере по угловому спектру мощности, который определяется физическими свойствами ранней Вселенной, описываемой космологическими параметрами. Такие подходы активно применяются в современных наблюдательных экспериментах [75, 78]. Процедура моделирования СМВ является одной из основных в современных пакетах анализа протяженного излучения [113, 198]. Кроме того, имеются стандартные шаблоны фоновых компонент протяженного излучения нашей Галактики в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах [76, 114], а также каталоги точечных объектов с микроволновым излучением [204]. Эти данные позволяют моделировать эксперимент на высоких радиочастотах и выделять другие компоненты излучения, например, от скоплений галактик по эффекту Сюняева-Зельдовича [63] или сигнал, связанный с распределением линзирующего потенциала, восстановленного по данным СМВ [115].

Существенным искажающим фактором при восстановлении распределения излучения на высоких гармониках ($\ell > 2000$) в процедуре разделения компонент является вклад протяженных радиоисточников. Он смешивается с наиболее запутанной фоновой компонентой на мелких масштабах — излучением от скоплений галактик, определяемым эффектом Сюняева-Зельдовича [80, 63]. Путаница происходит из-за наложения излучения радиогало скоплений радиогалактик внутри скоплений на область с СЗ-эффектом, а также дополнительного вклада собственного микроволнового излучения других галактик, содержащихся в скоплении. Наиболее деформирующим фактором при определении вклада СЗ-эффекта на данных масштабах в распределении фонового излучения может оказаться радиоизлучение гигантских радиогалактик с линейными размерами > 1 Мпк и угловыми размерами

$\theta > 4'$ [116, 29, 120], если они присутствуют в скоплении. Большинство известных объектов этой популяции являются сравнительно близкими ($z < 0.7$) радиоисточниками.

Для анализа вклада протяженных источников была разработана и реализована процедура моделирования распределения протяженных источников на полной сфере с возможностью вывода ограниченных площадок неба в рамках пакета GLESP¹ [198, 67]. Входной набор данных для построения случайного распределения на небе задается в виде логарифмической дифференциальной кривой $\log N - \log S$ ('логарифм числа источников — логарифм плотности потока').

4.2 Построение модели

Для моделирования распределения протяженных источников на небесной сфере было использовано несколько наборов входных данных:

- распределение радиоисточников по плотностям потоков: кривая ' $\log N - \log S$ ' [121];
- распределение протяженных источников по размерам, морфологии и позиционным углам на основе каталогизированных протяженных источников обзора WENSS [49];
- распределения по спектральным индексам для гигантских радиогалактик по данным РАТАН-600 и других радиотелескопов [106, 107, 108], 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 [99, 100, 101, 122, 123].

4.2.1 Морфология радиоисточников

Для исследования распределения параметров протяженных источников мы использовали каталог обзора северного неба на Вестерборкском радиотелескопе (The Westerbork Northern Sky Survey — WENSS) в Нидерландах. Обзор WENSS [49] проведен на частоте 325 МГц и имеет предельный поток на уровне около 18 мЯн ($\sim 5\sigma$) с разрешением $54'' \times 54'' \operatorname{cosec}(\delta)$, где δ — склонение. Он покрывает Северную часть неба выше 29° по склонению. Одной из важных для нас особенностей построения каталога WENSS является маркирование всех протяженных источников, которое позволила голландской группе подготовить новые списки гигантских радиогалактик (см., например, [11, 12]).

Для построения распределения по морфологическим свойствам мы использовали упрощенную классификацию по Фанарофф-Райли [10], представив двойные радиоисточники как тип FR II, а протяженные однокомпонентные источники как тип FR I. Такого типа

¹Пикселизация GLESP — Gauss Legendre Sky Pixelization, <http://www.glesp.nbi.dk>

объекты описывались как гауссиана с убывающей от центра радиояркостью. Общее число использованных протяженных источников из WENSS с определенными осями и позиционным углом составляет 24828 одиночных и 10586 двойных. В WENSS присутствует также некоторое количество многокомпонентных источников (с числом компонентов больше 2), однако они не рассматривались ввиду их малого числа и существенного усложнения модели для этого случая. С применением параметров, моделирующих структуру реального распределения яркости радиоисточника каталога WENSS, были построены следующие зависимости:

- распределение величин больших и малых осей источников (рис. 4.1, 4.2, 4.3 и 4.4);
- зависимость между большой и малой осью источника (рис.4.5);
- зависимость между осями компонент двойного источника (рис.4.9 и 4.10);
- распределение расстояния между компонентами двойного источника (рис.4.8);
- зависимость между расстоянием между компонентами и большой осью (рис.4.11).

В простейшем случае применяется случайное равномерное распределение положения объектов на небе в сферической системе координат, хотя имеется возможность задавать положение согласно Пуассоновскому распределению. Каждому объекту присваивается пара значений, соответствующих экваториальным координатам (долгота и широта). Строго говоря, в модели отсутствует зависимость других параметров от координат, поэтому отождествление модельных сферических координат с экваториальными носит условный характер. Далее при создании протяженной структуры источника эти координаты используются для задания положения его центра.

Рис.4.6 демонстрирует неравномерность распределения в каталогизированных данных WENSS параметра позиционного угла (p), определяющего ориентацию источника на сфере. Такое распределение может быть связано с наблюдательными селекционными эффектами (например, формой синтезированной диаграммой направленности радиоинтерферометра и процедурой чистки), поэтому в модели мы генерировали этот параметр в соответствии со случайным равномерным распределением. Таким образом, для каждого компонента используется свой параметр позиционного угла. С наибольшей частотой встречаются сонаправленные компоненты двойного радиоисточника. Эта зависимость для объектов из WENSS представлена на рис.4.7 и использовалась в модели.

В конечном итоге модель протяженных источников использует следующий набор параметров:

- координаты RA и Dec ;
- интегральная спектральная плотность потока F ;
- размер большой оси a ;

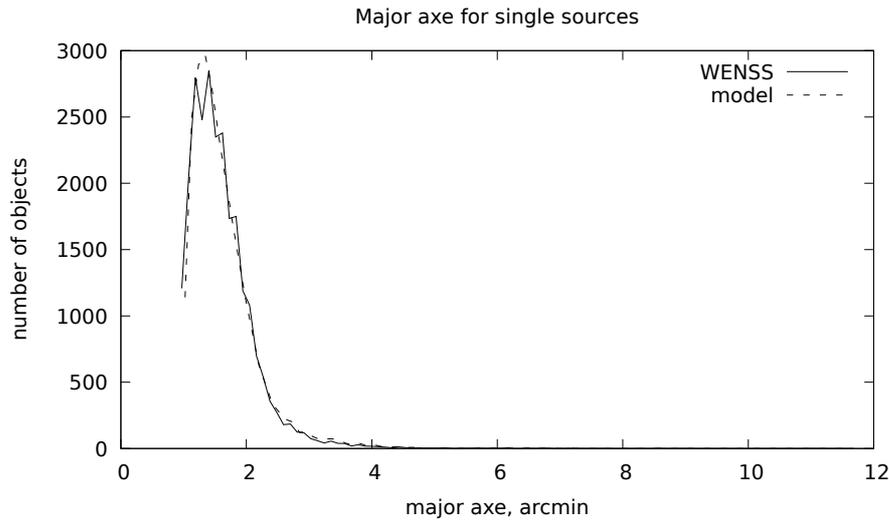


Рис. 4.1: Дифференциальные распределения большой оси для источников из каталога WENSS для одиночных источников. Сплошной линией обозначены данные WENSS, штрихованная соответствует модельным данным. Совместный результат диссертанта из работы [A8].

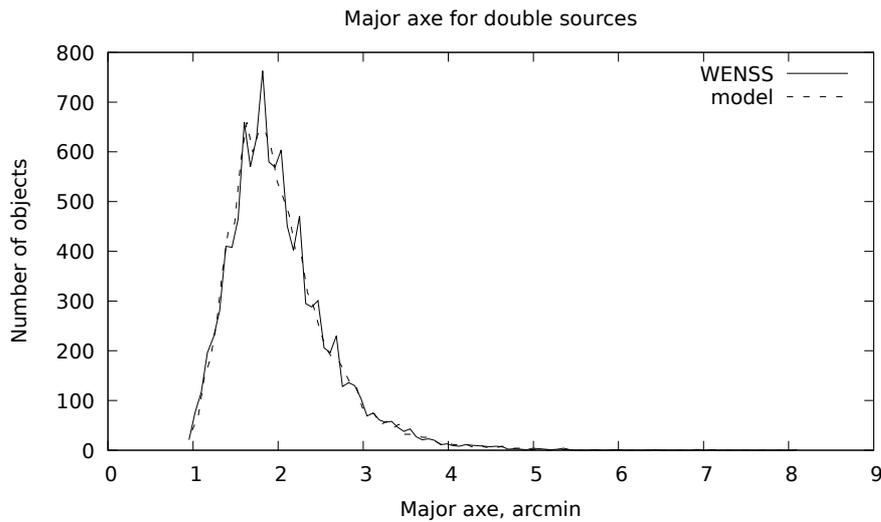


Рис. 4.2: Дифференциальные распределения большой оси для источников из каталога WENSS для двойных источников. Сплошной линией обозначены данные WENSS, штрихованная соответствует модельным данным. Совместный результат диссертанта из работы [A8].

- размер малой оси b ;
- позиционный угол pos ;
- интегральная плотность потока S_i источника.

Последний параметр модели — спектральной плотности потока источника — будет описан ниже.

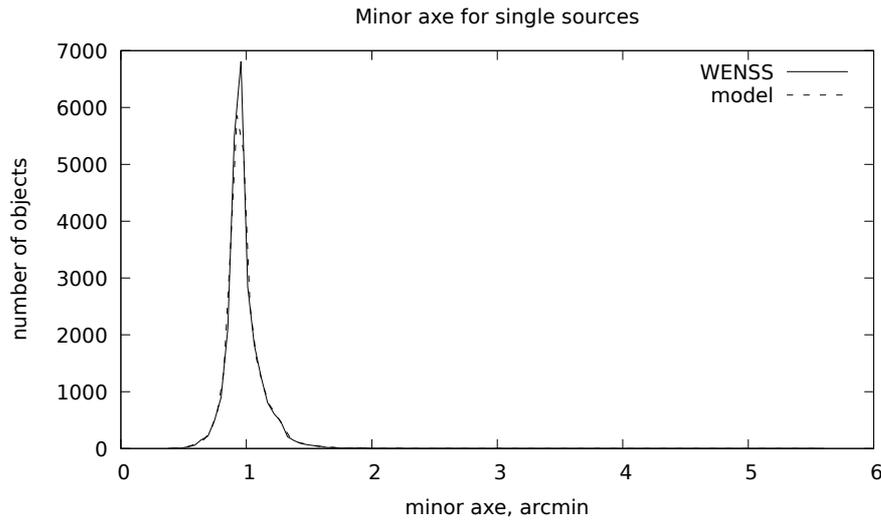


Рис. 4.3: Дифференциальные распределения малой оси для источников из каталога WENSS для одиночных источников. Сплошной линией обозначены данные WENSS, штрихованная соответствует модельным данным. Совместный результат диссертанта из работы [A8].

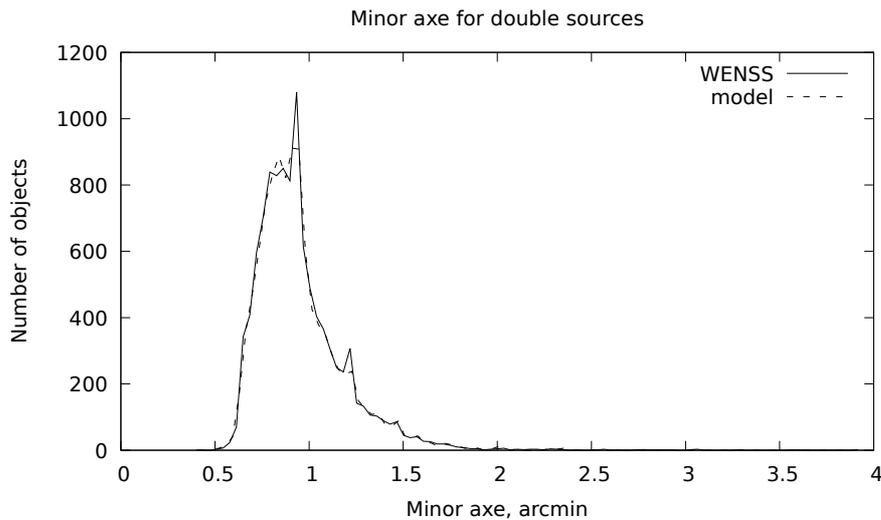


Рис. 4.4: Дифференциальные распределения малой оси для источников из каталога WENSS для двойных источников. Сплошной линией обозначены данные WENSS, штрихованная соответствует модельным данным. Совместный результат диссертанта из работы [A8].

В случае с одиночными объектами их собственные параметры соответствуют параметрам их единственного компонента. Для двойных источников используются дополнительные параметры расстояния между компонентами r и разности позиционных углов.

При генерации модельных параметров под соответствующим данным WENSS последние представлялись в виде функции плотности вероятности, заданной таблицей значений. Между узлами таблицы использовалась линейная интерполяция. В заданном промежут-

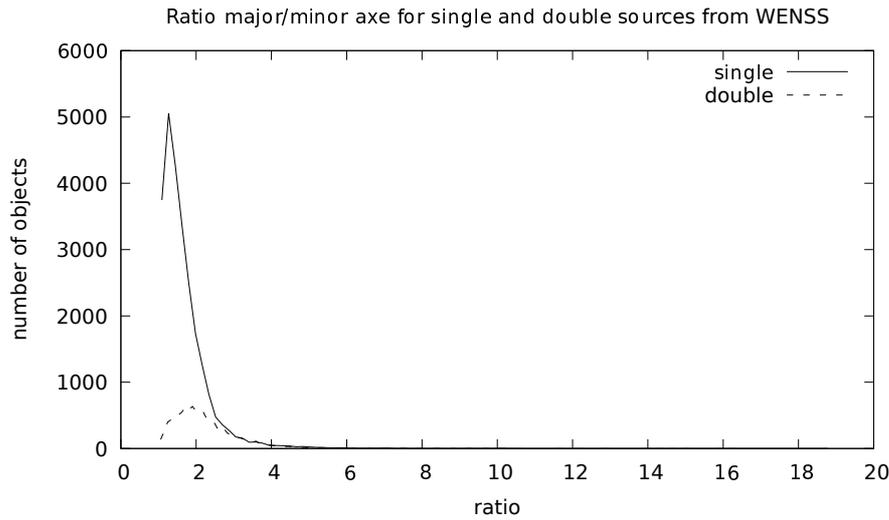


Рис. 4.5: Дифференциальные распределения отношения больших осей к малым для одиночных (сплошная линия) и двойных (штрихованная линия) источников из каталога WENSS. Совместный результат диссертанта из работы [A8].

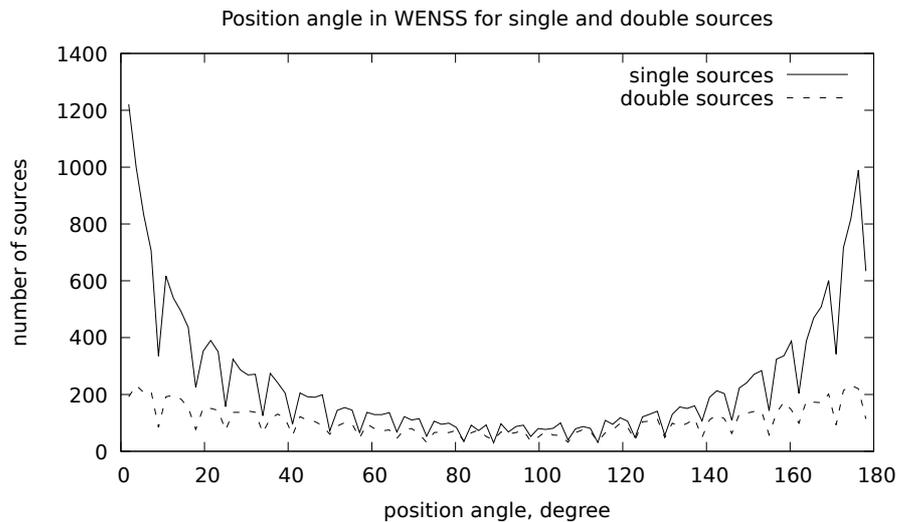


Рис. 4.6: Дифференциальные распределения позиционного угла (параметр *Position_Angle*) для источников из каталога WENSS для одиночных (single, сплошная линия) и двойных (double, штрихованная линия) источников, для которых он определен. На лицо явная неоднородность. Совместный результат диссертанта из работы [A8].

ке значений случайным образом генерировалось значение параметра, которое проходило проверку на вероятность своего появления в модели с помощью его подстановки в функцию плотности вероятности. При успешной проверке, значение записывалось в модель, при неуспешном процедура повторялась. При этом, параметр мог проходить несколько проверок в соответствии с существующими в модели зависимостями. Например, параметр малой оси компонента (b) генерировался в соответствии с распределением малой оси

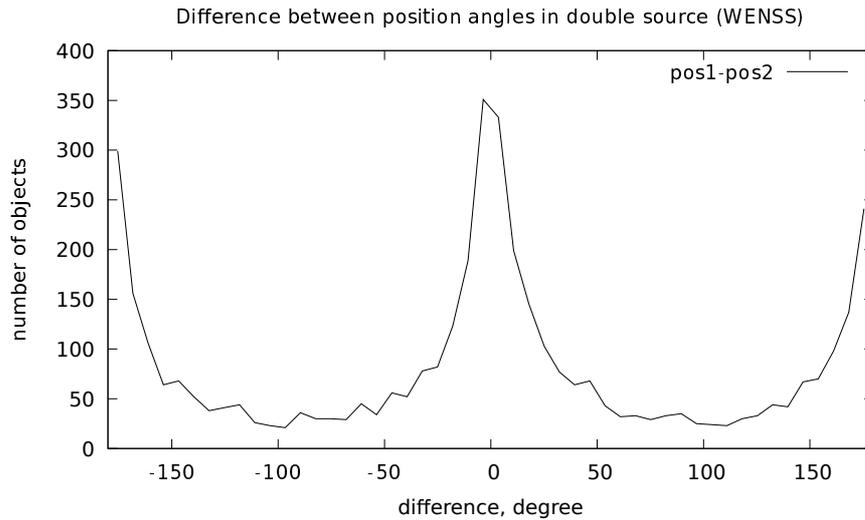


Рис. 4.7: Разность позиционных углов компонент, составляющих двойной источник WENSS, выраженная в градусах. Явно выделены величины около нуля, -180 и +180 градусов, соответствующие небольшим отклонениям от общего направления. Совместный результат диссертанта из работы [A8].

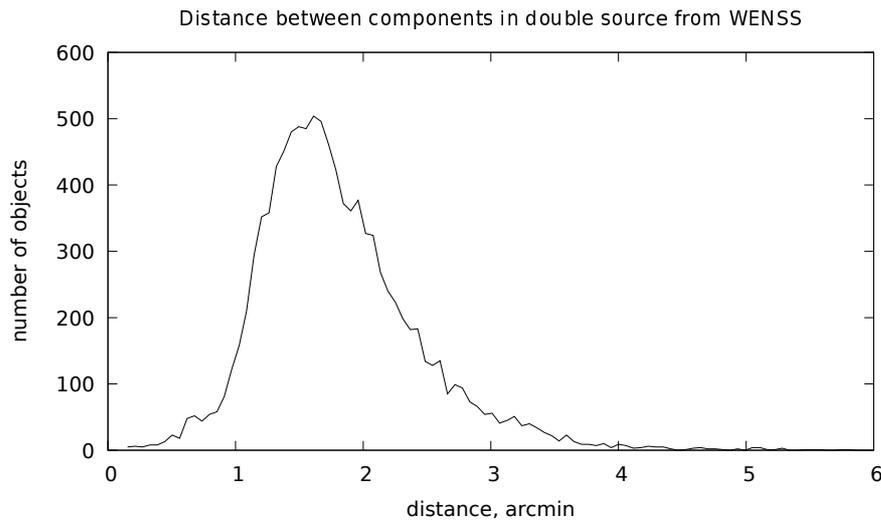


Рис. 4.8: Дифференциальное распределение расстояния между компонентами двойного источника WENSS. Совместный результат диссертанта из работы [A8].

источников из WENSS (рис.4.3) и зависимости от большой оси источника (4.5). При независимой генерации параметра малой оси от большой оси, очевидно, была бы нарушена морфология объектов. В случае же восстановления малой оси из большой с применением их взаимозависимости происходит “расползание” значений параметра (4.12).

4.2.2 Плотность потока

Для моделирования распределения по плотности потоков использовалась дифференциальная кривая подсчетов радиисточников $\log N - \log S$ на частоте 1.4 ГГц из работы [121]

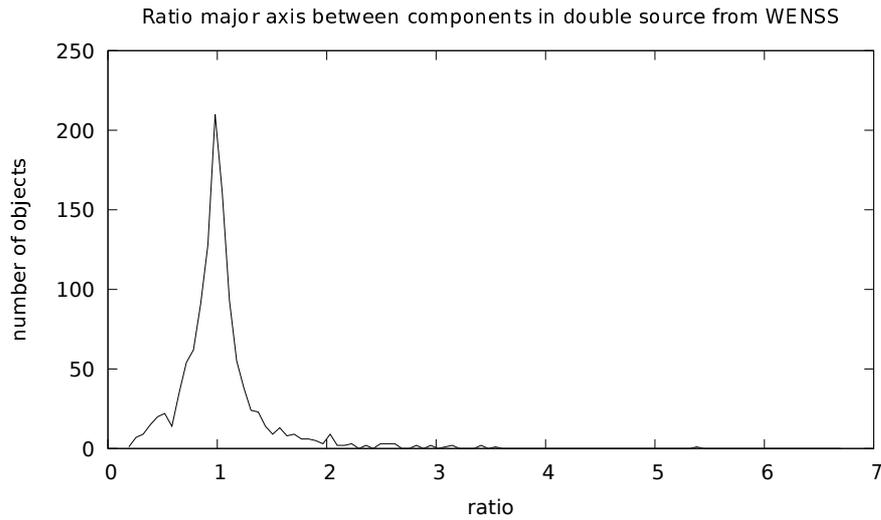


Рис. 4.9: Дифференциальное распределение отношения больших осей компонент двойного источника из WENSS. Совместный результат диссертанта из работы [A8].

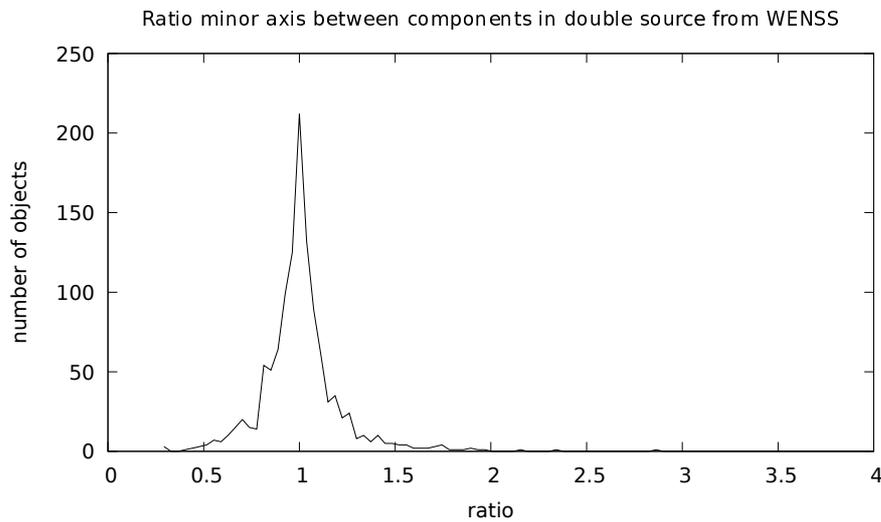


Рис. 4.10: Дифференциальное распределение отношения малых осей компонент двойного источника WENSS. Совместный результат диссертанта из работы [A8].

с минимальными значениями плотностей потоков на уровне $50 \mu\text{Ян}$ (рис. 4.13). Дифференциальная кривая $\log N - \log S$ (Рис. 10.1), определяемая как $n(S)$, где $n(S)dS$ — число радиоисточников в диапазоне плотностей потоков от S до $S+dS$ на заданной длине волны, показывает число источников в заданном интервале плотностей потоков в стерадиане. Ее обычно нормируют на коэффициент $S^{5/2}$, пропорциональный дифференциальному числу источников в Евклидовой модели [121]:

$$S^{5/2}n(S)dS = \frac{1}{4\pi} \int_0^{\infty} S^{5/2}\eta(S, z)dzdS, \quad 10.1$$

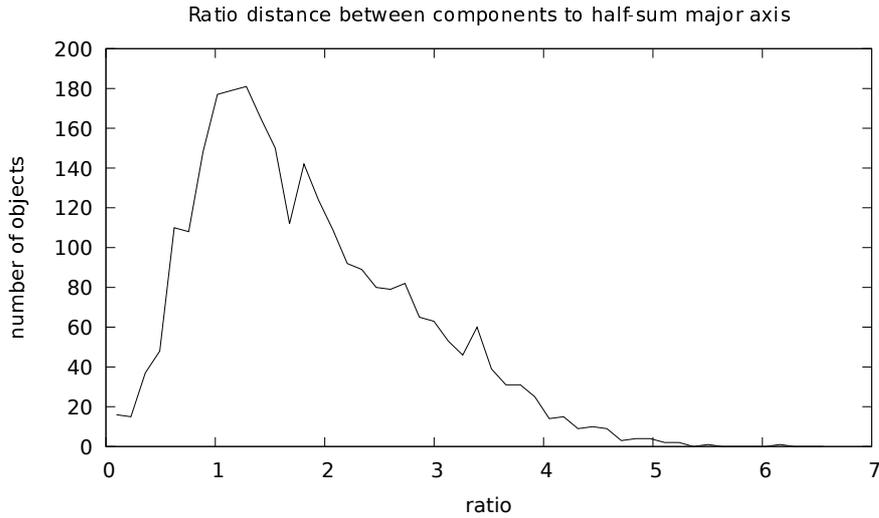


Рис. 4.11: Дифференциальное распределение отношения расстояния между центрами компонент к полусумме их больших осей. Это соотношение демонстрирует, насколько удалены друг от друга компоненты в масштабах собственного усредненного размера. Совместный результат диссертанта из работы [A8].

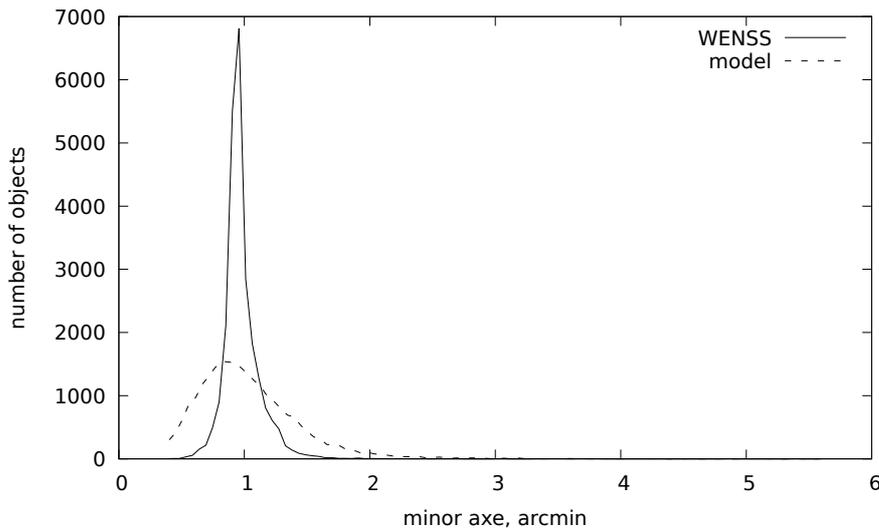


Рис. 4.12: Дифференциальное распределение параметра малой оси одиночного источника из WENSS (сплошная линия) и модельного (штрихованная), если генерировать последний без учета его собственного распределения, а лишь восстанавливать из отношения к большой оси. Совместный результат диссертанта из работы [A8].

где $\eta(S, z)dSdz$ — полное число источников с плотностями потоков от S до $S + dS$ в диапазоне красных смещений от z до $z + dz$:

$$\eta(S, z) = \frac{cA^2(1+z)^\alpha \rho(L, z)}{H_0(1+\Omega_0 z)^{1/2}}, \quad 10.2$$

где $\rho(L, z)$ — функция светимости радиоисточников, $A = 4\pi D^2$ — площадь сферы вокруг источника, содержащей наблюдателя, Ω_0 — параметр относительной плотности Вселенной. Вид кривой показан на рис. 4.13. Зависимость $\log N - \log S$ демонстрирует эволю-

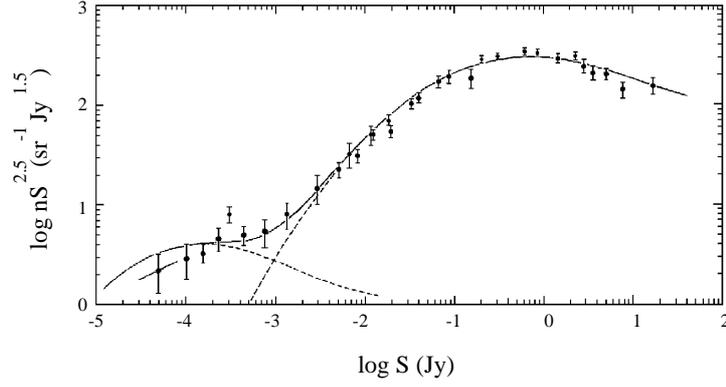


Рис. 4.13: Нормированная кривая подсчетов радиоисточников на частоте 1.4 ГГц. Сплошная кривая представляет наилучшую модельную зависимость с $\Omega_0 = 1$ (плоская Вселенная) из работы [121]. Штриховые линии показывают вклад радиоисточников, имеющих функцию светимости спиральных и эллиптических галактик. По абсциссе дана плотность потока в Янских, по ординате — логарифм дифференциального подсчета источников, умноженного на $S^{2.5}$, ($\text{sr}^{-1} \text{Ян}^{1.5}$). Подсчеты источников S проводились в пределах $30 \mu\text{Ян} \leq S < 60 \text{Ян}$ на частоте 1.4 ГГц Рис. из работы Кондона [121].

ционные особенности радиоисточников различных популяций (см., например, описание двойной популяционной объединенной модели радиоисточника [124, 125]). Отметим также, что область плотностей потоков радиоисточников со сравнительно большими красными смещениями лежит в диапазоне от 10 до 100 мЯн для 1400 МГц [126]. Более мощные радиоисточники в основном являются квазарами и радиогалактиками на умеренных и не очень больших красных смещениях ($z < 0.5$). Более слабые радиоисточники (с плотностью потока < 1 мЯн) связаны с близкими спиральными галактиками со звездообразованием.

Результаты моделирования разброса источников по плотности потока, построенного по данным [121], и вторичные подсчеты показаны на рис.4.14. Алгоритм моделирования распределения подобен описанному выше, используемому для генерирования других параметров модели. Оценки числа объектов при моделировании проводились 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 [108, 29, 30].

4.3 Спектр мощности

Используя описанную модель, мы сгенерировали 200 случайных реализаций положений радиоисточников с угловым размером $\theta > 4'$. Таких объектов согласно рассматриваемой модели — 294. По данным случайного распределения объектов на сфере мы рассчитали

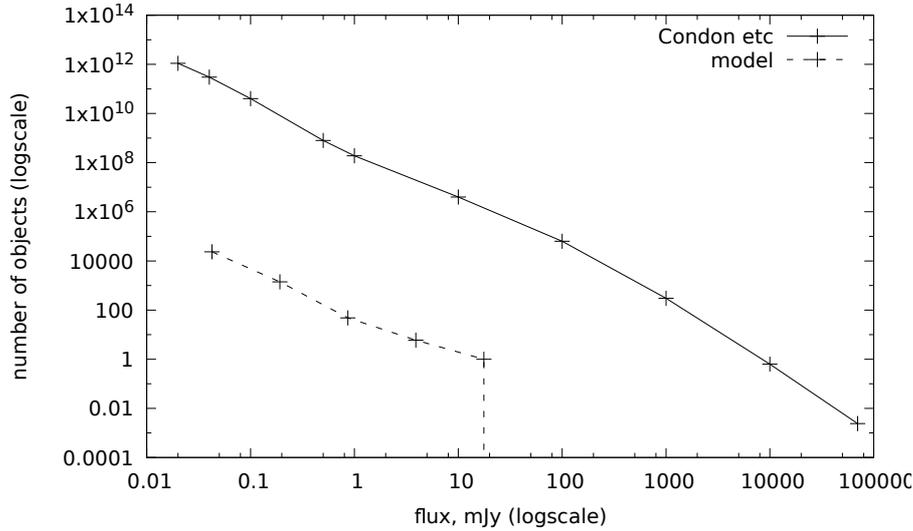


Рис. 4.14: Дифференциальное распределение потока, оси абсцисс и ординат имеют логарифмический масштаб. Сплошной линией обозначены данные из [121], штрихованной модельные. Ввиду ограниченно малого числа источников в модели, наблюдается полное отсутствие части распределения, соответствующего наиболее редким. Совместный результат диссертанта из работы [A8].

угловой спектр мощности, предварительно сгладив карту 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. 4.15. Важной особенностью анализа излучения протяженных радиоисточников является учет их вклада в распределение вторичной анизотропии микроволнового фона и возможная путаница с вкладом от излучения скоплений галактик, внутри которых и находятся радиогалактики. Если сравнить угловой спектр мощности от сигнала, обусловленного тепловым эффектом Зельдовича-Сюняева (см. рис.4 в работе [127]), то оказывается, что сигнал, собранный в спектре мощности от протяженных радиоисточников и оцененный в нашей модели, сравним по величине с СЗ-сигналом. В нашем случае мы пренебрегали очень слабыми протяженными источниками, которые также обнаружимы на уровне $\sim 4 - 5\sigma$ в обзоре NVSS [31]. Оценки, проведенные в работе [132], предполагают существование свыше десяти тысяч кандидатов в гигантские радиогалактики и просто протяженные радиоисточники с уровнем плотности потока > 1.4 , мЯн

4.4 Заключение по модели

В главе описано построение и применение метода генерирования распределений протяженных радиоисточников на полной сфере. Метод включает учет распределений источников по плотности потока, по размерам, морфологии и позиционным углам, а также спектральным индексам. В данной работе в качестве базовых каталогов использовались распределе-

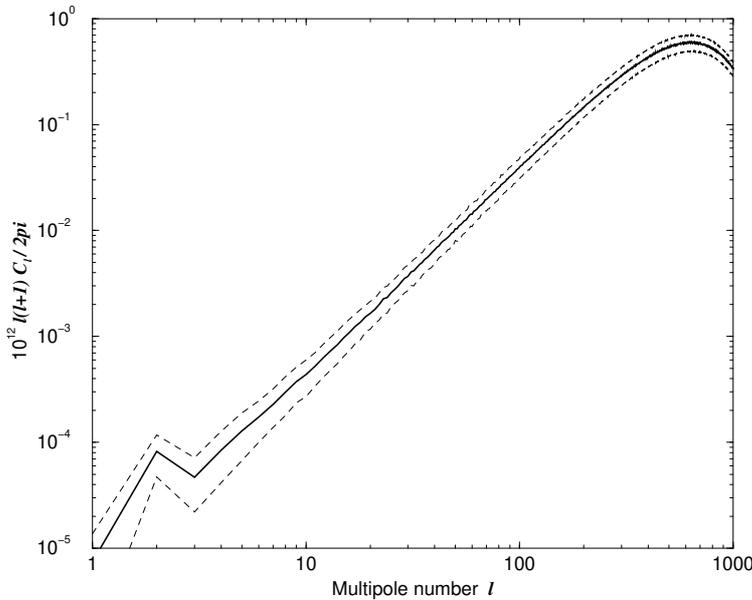


Рис. 4.15: Угловой спектр мощности $D_\ell = \ell(\ell + 1)C_\ell/2\pi$ сглаженной до $10'$ карты моделированного микроволнового излучения на длине волны 3 мм от протяженных радиоисточников с угловым размером $\theta > 4'$. Сплошной линией показан средний спектр, рассчитанный по 200 случайным реализациям положений и форм протяженных радиоисточников. Пунктирными линиями отмечены границы разброса на уровне $\pm 1\sigma$ от среднего. Совместный результат диссертанта из работы [A8].

ние по плотности потока ($\log N - \log S$) из работы [121] и распределения по параметрам протяженных источников из обзора WENSS [49]. Структурно организованный подход, а именно, задание распределений параметров с помощью ключей и символьных таблиц, позволяет применить и другие, заданные пользователем, данные. Метод реализован в рамках пакета GLESP (процедура *'mappat'*) [66].

В результате построения конкретной модели было продемонстрировано, что вклад протяженных радиоисточников в миллиметровом диапазоне должен искажать угловой спектр мощности, обусловленный эффектом Сюняева-Зельдовича. Это факт может также частично объяснить и небольшое число (~ 1.8 тыс) объектов в каталоге СЗ-объектов, опубликованном по данным анализа карт Planck [63]. А с учетом потенциального сигнала, вызванного обратным эффектом Комптона при взаимодействии энергичных электронов протяженных компонент и струй с фотонами СМВ [120], общая картина становится еще сложнее.

Важно отметить также, что предложенный подход не является окончательным и модель развивается. В частности, возможен учет новых расчетов, связанных с построением функции светимости протяженных радиогалактик вплоть до больших красных смещений ($z \sim 6$) [133] и расширения ее с помощью новых моделей распределения источников [134, 135], разрабатываемых для космического эксперимента “Миллиметрон” [136].

Глава 5

Поиск кандидатов в объекты с эффектом Сюняева-Зельдовича в окрестности радиоисточников

5.1 Введение

Гигантский объем наблюдательной информации, поступающей с наземных и спутниковых телескопов, позволяет в рамках потокового анализа данных с применением корреляционного анализа значительно увеличить число малочисленных популяций астрофизических объектов. Одним из космических экспериментов, анализ данных которого продолжается, является миссия Planck Европейского Космического Агенства. Общий объем информации, доступной для научного анализа, составляет несколько терабайт и требует наличия автоматической обработки, поиска и отождествления объектов с заданными характеристиками. При этом часть наблюдаемых объектов на картах неба оказывается пропущенной в публикуемых каталогах. Проблема неполноты каталогов может быть решена при помощи новых алгоритмов и программ, чувствительных к топологическим, статистическим и спектральным характеристикам многочастотных карт космических миссий. Решение этой задачи позволит дополнить текущие каталоги недостающими объектами и проводить космологические исследования, используя всю полноту доступной информации.

В последнее десятилетие в наблюдательной астрофизике были проведены несколько обзоров, которые позволили значительно улучшить точность (лучше 1%) измерения космологических параметров. Среди этих обзоров выделяются эксперименты на космических обсерваториях NASA WMAP [75] и ESA Planck [78] по измерению неоднородностей карты реликтового излучения, а также спектроскопический обзор галактик BOSS (Barion Oscillation Spectroscopic Survey) [178], проводимый в рамках исследования барионных акустических осцилляций как часть Слоановского цифрового обзора неба III (Sloan Digital Sky Survey III) [179]. Анализ данных этих обзоров привел к уточнению космологических

параметров с выдающимся уровнем точности и построению современной эволюционной модели Вселенной от первых долей секунды ее существования до наших дней.

Среди лидирующих направлений в космологических исследованиях остается изучение скоплений галактик в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах, наблюдаемых благодаря эффекту Сюняева-Зельдовича [80], а также в рентгеновском диапазоне, где излучает горячий газ, и просто в видимом свете. Эти исследования позволяют проследить эволюцию масс скоплений и особенности формирования крупномасштабной структуры Вселенной в различные космологические эпохи.

Существенное расширение списка скоплений галактик в миллиметровом диапазоне связано с появлением многочастотных измерений микроволнового излучения, подобных экспериментам Planck [63], SPT [180] и ACT [181]. Первые данные обсерватории Planck показали, что зарегистрированное число скоплений галактик (~ 1.6 тыс.), наблюдаемых с помощью СЗ-эффекта, значительно (на 2 порядка) меньше, чем ожидается по данным оптических обзоров и моделированию. Несколько селекционных эффектов может влиять на результаты обнаружения скоплений галактик с СЗ-механизмом. Это и трудноудаляемое фоновое излучение нашей Галактики, и точечные источники излучения, чей вклад в микроволновый фон перекрывает глубину ЗС-эффекта, и зависимость амплитуды излучения, определяемой этим эффектом, от массы скоплений, которая может иметь сравнительно большой разброс.

Также важно отметить, для исследования далекой Вселенной используются и радиоисточники [164, 106, 182]. Набор их физических свойств делает радиоисточники мощным средством для тестирования космологических эпох. С ними связаны и поиск самых далеких активных ядер галактик [89, 166], и поиск протоскоплений [148], и оценки сгущивания фоновых объектов на разных красных смещениях [148, 183], и исследования гравитационного линзирования. С учетом возможностей миллиметровых и субмиллиметровых обзоров естественным образом возникает и задача поиска скоплений галактик с помощью эффекта Сюняева-Зельдовича, в которых находятся радиоисточники как на малых, так и на больших красных смещениях. В данной работе мы проверим возможность обнаружения СЗ-эффекта в окрестности радиоисточников низкочастотного обзора WENSS [49] с применением многочастотных микроволновых карт космической миссии Planck.

5.2 Данные Planck

Данные Planck, благодаря лучшему чем у WMAP угловому разрешению (порядка 5 минут дуги) и чувствительности, позволили проводить исследования как точечных источников разных популяций, так и протяженных, размером от нескольких минут до десятков минут дуги, ассоциированных со скоплениями галактик. В этом плане при изучении скоплений галактик в микроволновом диапазоне космическая обсерватория Planck сыграла наиболее существенную роль, а построенные в результате ее работы карты полного неба на

девяти частотах микроволнового диапазона: 30, 44, 70, 100, 143, 217, 353, 545 и 847 ГГц, являются основой для большого числа научных исследований, проводящихся в различных институтах разных стран. Карты спутника Planck¹ [184] Европейского космического агентства (ESA) были открыты для научного сообщества в 2013 г. и сразу стали эффективным инструментом в решении многих задач галактической и внегалактической астрономии. Кроме того, были представлены каталоги обнаруженных источников миллиметрового и субмиллиметрового излучения, имеющие галактическое и внегалактическое происхождение. Измерения потоков излучения в миссии были проведены на высокочастотном комплексе (High Frequency Instrument — HFI) с полосами 100 ГГц и более высоких частот, а также на низкочастотном (Low Frequency Instrument — LFI) с полосами на частотах ниже 100 ГГц. Угловое разрешение карт на частоте 30 ГГц составило $\sim 32'$, частотах выше 145 ГГц — $\sim 5'$, Точность определения координат источников на различных наблюдательных частотах варьируется от $50''$ до $40''$ [185]. Архив миссии Planck (Planck Legacy Archive - PLA²), содержит как карты компонент излучения, так и списки обнаруженных объектов, включая скопления галактик с эффектом Сюняева-Зельдовича.

Напомним, что различают два вида СЗ-эффекта: тепловой (tSZ), когда фотоны рассеиваются при случайном движении тепловых электронов, и кинематический (kSZ), обусловленный общим объемным движением электронов [186, 187]. В первом случае рассеянные фотоны СМВ имеют спектральную зависимость, во втором — при kSZ-эффекте спектр остается планковским. При действии теплового эффекта Сюняева-Зельдовича на низких наблюдательных частотах Planck в направлении на скопление будет регистрироваться недостаток фотонов из-за увеличения их энергии. Это приведет к появлению в области скопления галактик “ямки” в миллиметровом диапазоне. За счет увеличения числа фотонов с большей энергией в субмиллиметровом диапазоне в направлении на скопление будет наблюдаться локальный пик излучения. Физически СЗ-эффект связан с обратным комптоновским взаимодействием фотонов СМВ и свободными электронами горячего газа скоплений галактик. В результате рассеяния эффективный спектр отклоняется от чернотельного. Единственный свободный параметр — параметр комптонизации Y_{SZ} , который описывается просто амплитудой. Микроволновой спектр скопления галактик, наблюдаемый в результате СЗ-эффекта, приводит к отрицательному сигналу на частотах 30–143 ГГц и положительному - на частотах после 217 ГГц. Это соотношение является уникальной наблюдательной особенностью, позволяющей выделять ее среди других вариаций фона. Так как эффект слабый, то его удастся зарегистрировать только для наиболее ярких скоплений галактик. Для более слабых объектов карта Y_{SZ} становится чувствительной и к параметрам моделирования, и к систематическим ошибкам.

Задача обнаружения и исследования скоплений галактик по эффекту Сюняева-Зельдовича — одна из самых главных из заявленных в миссии Планк, а также в дру-

¹<http://www.rssd.esa.int/Planck/>

²<http://pla.esac.esa.int/>

гих современных исследованиях СМВ с хорошим угловым разрешением [188, 189, 82]. СЗ-эффект дает ряд преимуществ при изучении скоплений галактик. Параметр комптонизации Y_{SZ} , с помощью которого измеряют интегральное давление газа вдоль луча зрения и амплитуду ЗС-сигнала, не испытывает космологическое ослабление по поверхностной яркости. Это делает СЗ-эффект мощным методом поиска скоплений галактик на больших красных смещениях. Полный СЗ-сигнал, интегрированный по угловому размеру, напрямую измеряет полную тепловую энергию газа и, следовательно, массу, с которой, как ожидается, коррелирует температура газа.

По результатам 29 месяцев наблюдений миссии Planck был подготовлен каталог, содержащий 1653 скопления галактик и кандидатов в скопления, в которых проявляется ЗС-эффект из области, занимающей 83.5% неба.

В нем имеется 1203 подтвержденных оптическими наблюдениями скопления галактик. Представленный каталог является крупнейшим и наиболее полным, содержащим 1094 объектов с известными красными смещениями вплоть до $z \sim 1$. Массы скопления распределены в довольно широком диапазоне $(0.1 \div 1.6) \times 10^{15} M_{\odot}$.

5.3 Построение алгоритма

5.3.1 Селекция объектов

В данной главе описывается развитие предложенного ранее [102] метода селекции кандидатов в скопления галактик с помощью каталогов радиоисточников и карт космического микроволнового фонового излучения. Суть метода заключается в использовании космологических свойств формирования мощных внегалактических радиоисточников. Такие объекты принадлежат к популяции галактик самой высокой светимости, что делает возможным их изучение на больших красных смещениях и тем самым использовать как зонды состояния Вселенной в другие космологические эпохи. Чрезвычайно важным моментом при исследовании этих источников может считаться тот факт, что их родительскими галактиками являются гигантские эллиптические галактики (gE), которые, в принципе, могут использоваться как стандартные линейки и часы [182, 190, 191]. Правда, следует отметить, что самыми мощными радиоисточниками являются галактики в период большого мерджинга, в результате которого и формируются gE, а также то, что не все gE-галактики являются родительскими объектами для мощных радиоисточников. Еще один момент, связанный с гигантскими эллиптическими галактиками состоит в том, что их изучение важно и при прослеживании эволюции звездных систем на больших красных смещениях, и при поиске далеких групп галактик или протоскоплений галактик, в центре которых они находятся, и при исследовании процессов слияния и взаимодействия, на которые может указывать проявляющаяся активность их ядер. Эпоха, во время которой происходит пик слияний галактик, продолжается во Вселенной возрастом от от 1.5 до 4 млрд.лет, что соот-

ветствует красным смещениям от 5 до 1.2 в стандартной Λ CDM-космологической модели (модель с доминированием темной энергии и холодной темной материи). Так, в работе [148], посвященной исследованию окружения далеких радиогалактик по наблюдениям Ly- α , измерялось красное смещение, и с использованием данных о плотности объектов делался вывод об их принадлежности к протоскоплению. Было показано, что 75% радиогалактик с $z > 2$ ассоциируются с протоскоплениями. Отсюда авторы получают оценку, что приблизительно 3×10^{-8} формирующихся скоплений попадает в интервал $2 < z < 5.2$ на сопутствующий куб со стороной 1 Мпк с активным радиоисточником. Но очень вероятно, что в заданном диапазоне красных смещений число протоскоплений галактики может быть больше, т.к. активный радиоисточник может просто не наблюдаться. Таким образом, используя лишь данные радиообзоров: каталоги радиоисточников и карты микроволнового фона, можно отобрать объекты - кандидаты в скопления галактик.

Использование каталога обзора WENSS (The Westerbork Northern Sky Survey), проведенного на Северном небе с помощью Вестерборкского радиотелескопа в Нидерландах, не случайно. Обзор WENSS [49] был проведен на частоте 325 МГц и имеет предельный уровень плотности потока около 18 мЯн (что соответствует $\sim 5\sigma$). Угловое разрешение радиоинтерферометра составило $54'' \times 54'' \cos(\delta)$, где δ — склонение. Обзор покрывает Северную часть неба выше 29° по склонению. Хорошая чувствительность на низкой частоте позволяет отождествлять радиоисточники с данными обзоров, проведенных на более высоких частотах. Это, в свою очередь, позволяет отбирать источники с крутыми радиоспектрами, которые ассоциируются с далекими радиогалактиками [148, 192, 193]. Таким образом, применение низкочастотного каталога радиоисточников при поиске объектов с эффектом Сюняева-Зельдовича поможет найти кандидаты в далекие скопления галактик. Первые поиски эффекта с помощью данных WENSS были проведены в работах [194, 195], и здесь мы развиваем предложенный подход. Площадь обзора WENSS составила порядка 10000 кв.градусов, а каталог содержит 211234 радиоисточника. На рис. 5.1 черным цветом показано заполнение области обзора радиоисточниками при наложении на карту реликтового излучения.

Каталог разбит на полчасовые записи по прямому восхождению, и для начального анализа мы использовали первые два часа. Количество объектов в исследуемом интервале составило 16384 шт. Анализируемая площадь показана на рис. 5.2.

5.3.2 Алгоритм селекции

Алгоритм отбора кандидатов содержит несколько этапов:

1. Вырезание зоны в окрестности радиоисточников низкочастотного каталога WENSS [49] из карт микроволнового излучения со стороной $30'$: на частотных картах 100, 143, 217, 353, 545 ГГц и карте реликтового излучения, превышающий размер диаграммы направленности на частоте 217 ГГц примерно в 6 раз (и в три раза поисковый размер,

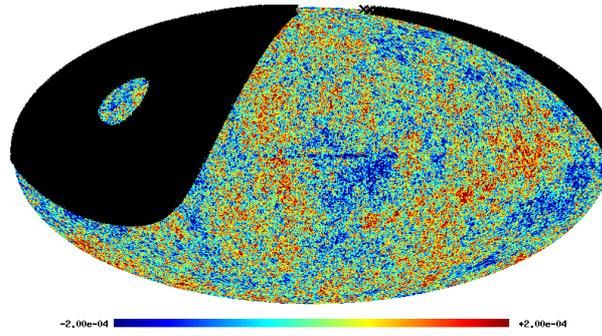


Рис. 5.1: Карта реликтового излучения SMICA Planck в галактических координатах. Черным цветом показано заполнение области полного обзора WENSS (24 часа по прямому восхождению) радиоисточниками. Совместный результат диссертанта из работы [A9].

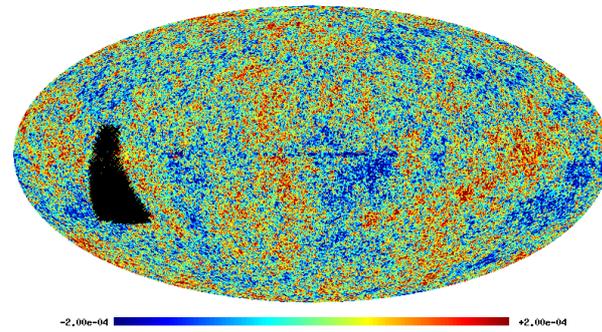


Рис. 5.2: Карта реликтового излучения SMICA Planck в галактических координатах. Черным цветом показано заполнение радиоисточниками области обзора WENSS (границы области по прямому восхождению: $0^h < \alpha < 2^h$). Совместный результат диссертанта из работы [A9].

используемый при анализе данных в работах Planck [185].

2. Выделение потенциальных СЗ-источников с помощью стандартной программы поиска ‘*SExtractor*’ [103] в радиусе 7 минут дуги от центра площадки (при ширине диаграммы направленности радиотелескопа $\sim 5'$) на частотах 100 и 143 ГГц — с отрицательной амплитудой, а на 353 и 545 ГГц — с положительной.
3. Сравнение амплитуды 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 [197], уменьшает искажения в площадках (рис. 5.3), что, в свою очередь, увеличивает контраст меньших неоднородностей. Минимум на карте СМВ наблюдается в направлении скопления галактик

с эффектом СЗ-эффекта. Он образуется в результате выполнения процедуры разделения компонент [196].

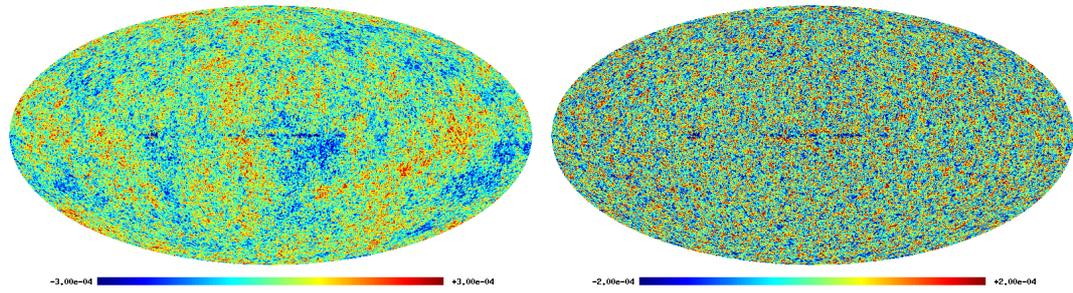


Рис. 5.3: Карта CMB SMICA Planck [184]. Слева: карта CMB с полным набором сферических гармоник ($2 \leq \ell \leq 2500$). Справа: карта CMB с $20 < \ell \leq 2500$. Совместный результат диссертанта из работы [A9].

Блок-схема селекции кандидатов в объекты с эффектом Сюняева-Зельдовича показана на рис. 5.4.

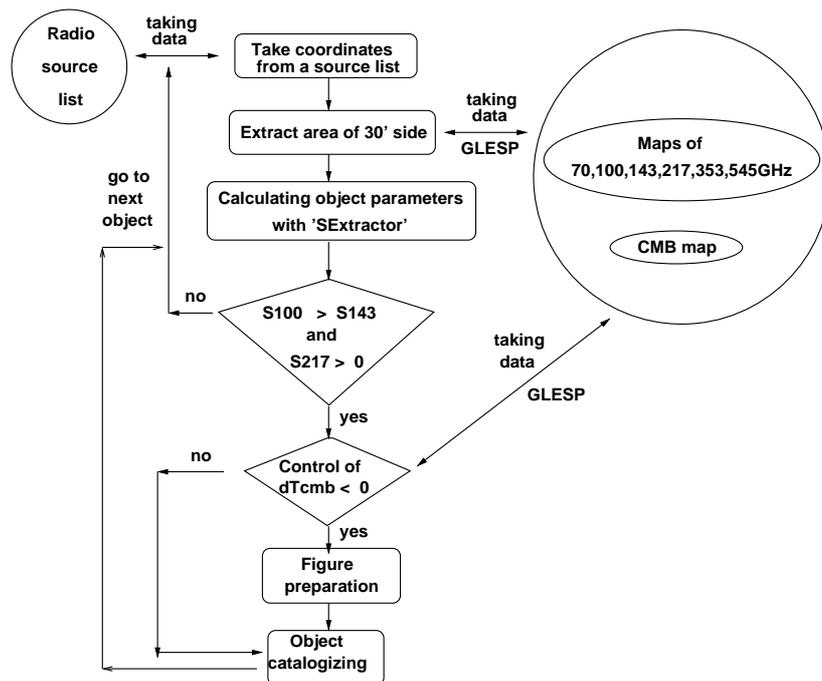


Рис. 5.4: Блок-схема селекции кандидатов в объекты с эффектом Сюняева-Зельдовича в окрестности радиоисточников. Совместный результат диссертанта из работы [A9].

Для прохождения этапов селекции были разработаны специализированные командные файлы на языке управления заданиями *'Shell'* в операционной среде ОС Linux Scientific 6.4. Базовые утилиты (команды) работы с изображениями (вырезание из исходных карт *'mapcut'* и подготовка графического анализа *'f2fig'*) вызывались из пакета GLESP [198, 66]. Для выделения источников использовалась программа *'SExtractor'* [103]. Промежуточные

карты готовились и сохранялись в архиве в стандартном астрономическом формате описания изображений FITS [104]. Отформатированные карты всего неба в микроволновом диапазоне в стандарте GLESP, которые использовались для анализа изображений, доступны на сайте CMB³ [199].

5.4 Результаты

5.4.1 Популяция радиоисточников

В таблице 5.2 приведены основные характеристики радиоисточников, отобранных по предложенной методике. Каталог содержит список из 381 объекта WENSS из диапазона прямых восхождений $0^h \leq \alpha \leq 2^h$, отобранного при дополнительном визуальном контроле. В колонках приведены имя объекта из каталога WENSS, плотность потока на частоте 326 ГГц, спектральный индекс γ ($S \sim \nu^\gamma$) на частоте 1.4 ГГц, рассчитанный как тангенс угла наклона касательной к непрерывному радиоспектру. Радиоспектры строились с использованием плотностей потоков источников, измеренных в разных обзорах, из базы данных CATS⁴ и процедуры анализа радиоспектров 'spg' [41] системы обработки континуальных данных на РАТАН-600 [34].

На рис. 5.5 приведена статистика радиоспектральных индексов на частотах 326 МГц, 1.4 и 4.85 ГГц для популяции отобранных радиоисточников. На рис. 5.6 показана диаграмма “спектральный индекс γ на частоте 1.4 ГГц — вариация температуры CMB”. Распределение уровня флуктуаций на карте CMB SMICA Planck с мультиполями $20 < \ell \leq 2500$ в направлении на радиоисточники продемонстрировано на рис. 5.7. Пунктирными линиями показаны распределения $\pm 1\sigma$ и $\pm 3\sigma$ -уровней флуктуаций в стандартной Λ CDM-космологической модели по данным 200 реализаций случайной гауссовой карты CMB. Данные нормированы к числу пикселей. Случайные гауссовы реализации неоднородностей CMB моделировались в рамках космологии Λ CDM с помощью специализированной программы 'cl2map' пакета GLESP [198].

Распределение по спектральным индексам (рис. 5.5) 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 $\gamma_{\text{med}} = -0.79$. 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 (см. рис. 5.6). Мы сравнили распределение откликов на карте CMB SMICA в направлении на радиоисточники с ожидаемым в Λ CDM-космологической модели по данным 200 случайных гауссовых

³<http://cmb.sao.ru>

⁴<http://cats.sao.ru>

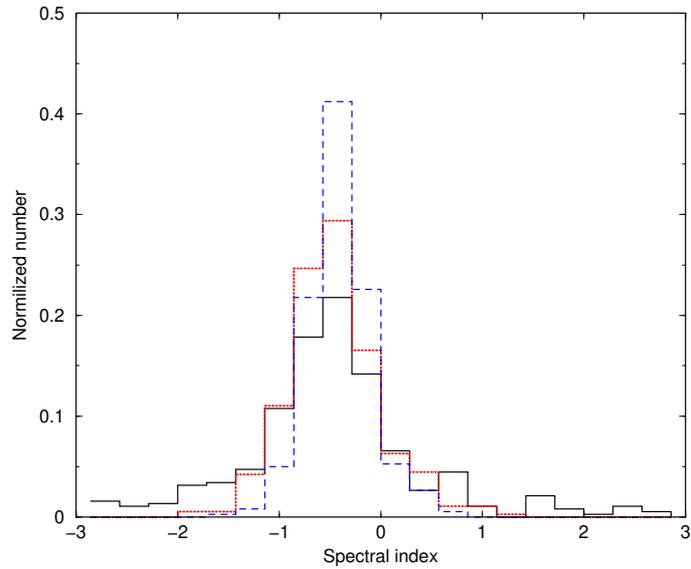


Рис. 5.5: Нормированное распределение спектральных индексов популяции радиоисточников WENSS с СЗ-эффектом из диапазона R.A. $0^h \leq \alpha < 2^h$ на частотах 326 МГц (сплошная линия), 1.4 (пятих-пунктирная линия) и 4.85 ГГц (пунктирная линия). Совме

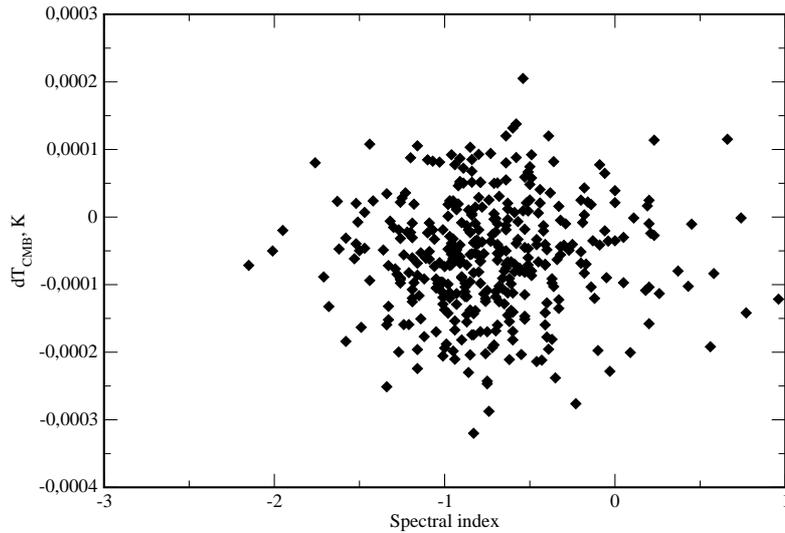


Рис. 5.6: Диаграмма “спектральный индекс $\gamma_{1.4\text{GHz}}$ — вариация СМВ $\delta T_{\ell \in [21;2500]}$ ” для радиоисточников исследуемой подвыборки. Совместный результат диссертанта из работы [A9].

реализаций СМВ (рис. 5.7). Кроме того, что положение максимума распределения отклика сигнала на карте SMICA смещено в отрицательном направлении за предел 1σ , оно имеет значительные искажения в области положительного сигнала, включая недостаток положительных откликов, превышающий уровень разброса 3σ .

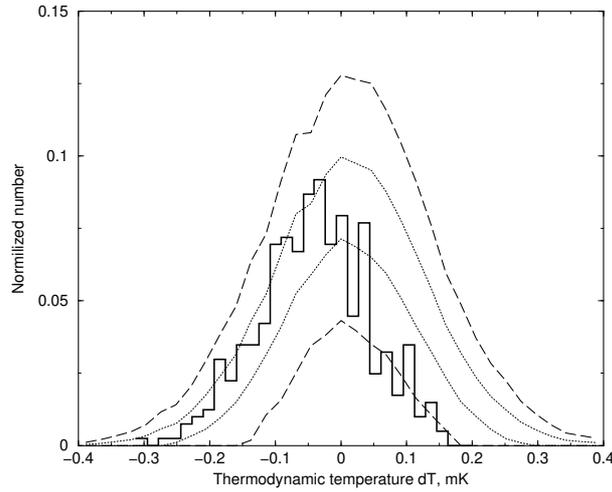


Рис. 5.7: Распределение уровня флуктуации СМВ в направлении на радиоисточники исследуемой подвыборки. Использована карта СМВ SMICA Planck с мультиполями $20 < \ell \leq 2500$. Пунктирными линиями показаны распределения $\pm 1\sigma$ и $\pm 3\sigma$ -уровней флуктуаций в стандартной Λ CDM-космологической модели по данным 200 реализаций случайной гауссовой карты СМВ. Совместный результат диссертанта из работы [A9].

5.4.2 Статистика отождествлений

Разработанный набор процедур на основе утилит пакета GLESP [66] был применен в процессе обработки карт неба в области исследуемой части обзора. Как уже говорилось ранее, для анализа мы использовали данные по радиоисточникам каталога WENSS в диапазоне прямых восхождений $0^h < \alpha < 2^h$ и склонениях $20^\circ < d < 76^\circ$, содержащих астрометрическую (координаты) и астрофизическую (плотности потока) информацию на частоте 326 ГГц, для 16364 объектов. После автоматической процедуры селекции кандидатов были отобраны 1778 объектов (10.9% от общего списка), из которых с помощью визуальной инспекции был оставлен 371 источник (2.3% от общего списка) с наиболее типичными контрастными признаками наличия эффекта. Данные работы алгоритма и последующего визуального контроля сведены в Таблицу 5.4.2.

Отметим, что визуальный контроль позволяет также отделить объекты с нетривиальными особенностями в области положительных пиков на низких частотах ($\nu < 217$ ГГц). Такие топологические эффекты возникают, когда в области центра источника в радиусе размером 1.5 диаграммы направленности антенны радиотелескопа сигнал имеет сложную структуру. Например, имеются два положительных пика. Тогда возникает дополнительный локальный минимум, который алгоритм и детектирует. Так, кроме сигнала, топологически близкого к ожидаемому в случае присутствия эффекта Сюняева-Зельдовича, можно обнаружить по результатам работы алгоритма и радиоисточники, имеющие в исследуемой зоне максимум на низких или на всех частотах, и часто даже на опубликованной карте реликтового излучения. Кроме того, также было проведено отождествление най-

Таблица 5.1: Распределение объектов по интервалам прямого восхождения (1-ый столбец): $00 : 00 \leq \alpha < 00 : 30$, $00 : 30 \leq \alpha < 01 : 00$, $01 : 00 \leq \alpha < 01 : 30$ и $01 : 30 \leq \alpha < 02 : 00$. Во втором столбце приведено количество радиоисточников в соответствующем интервале прямых восхождений каталога WENSS. В третьем — число объектов, отобранных по критерию наличия отрицательных пиков на частотах 100 и 143 ГГц и положительного пика на частоте 353 ГГц, в четвертом столбце приведены данные отбора наиболее ярких (контрастных) примеров объектов с эффектом Сюняева-Зельдовича. В скобках указано процентное содержание от числа объектов в исходном каталоге. Совместный результат диссертанта из работы [A9].

R.A.	N_{WENSS}	$N_{100\&143}$	N_{visual}
0000	4170	421 (10.1%)	144 (3.4%)
0030	4215	481 (11.4%)	104 (2.5%)
0100	4021	428 (10.6%)	65 (1.6%)
0130	3958	448 (11.3%)	68 (1.7%)

денных объектов с каталогом СЗ-объектов миссии Planck [200] и каталога данных обзора SDSS [201], содержащего близкие скопления галактик с красными смещениями $z < 0.42$. Было обнаружено шесть совпадений с объектами каталога Planck, в котором содержатся порядка 1.6 тыс объектов, а также 19 совпадений с данными по скоплениям из обзора SDSS. Любопытным фактом является детектирование 72 радиоисточников не только на картах, построенных для многочастотных данных, но и на карте реликтового излучения. Примеры обнаружения объекта отождествления в результате работы алгоритма показаны на рис. 5.8, 5.9, 5.10, 5.11, 5.12 и 5.13. На рис. 5.8 и 5.9 приведены изображения области вокруг радиоисточников WENSS из нашего списка с искомым сигналом на разных частотах, для которых имеются отождествления с объектами из каталога скоплений Planck. На рис. 5.10 и 5.11 показаны многочастотные изображения новых объектов, имеющих топологию сигнала, ожидаемому при наличии СЗ-эффекта. На рис. 5.12 и 5.13 показаны изображения с радиоисточниками на разночастотных картах Planck и на карте СМВ.

Таким образом, по данным исследования можно сделать несколько важных выводов:

1) Кандидаты в объекты со слабо наблюдаемым эффектом Сюняева-Зельдовича на картах миссии Planck есть. Их на полном небе, 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 числом нет.

2) Эффект “ямки” на карте СМВ при отборе кандидатов в СЗ-объекты 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

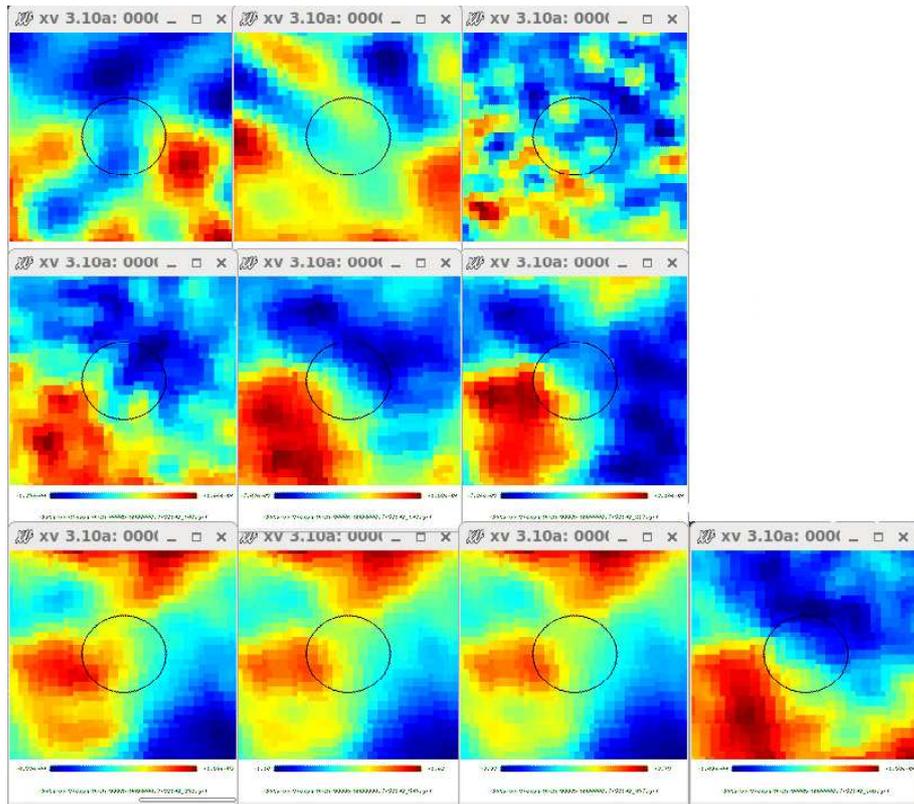


Рис. 5.8: Изображения области размером $30' \times 30'$ вокруг радиоисточника WNB 0008.7+5121 из каталога WENSS на картах космической миссии Planck соответственно справа налево сверху вниз на частотах 30, 44, 70, 100, 143, 217, 353, 545, 857 ГГц, а также (последняя картинка) — на карте реликтового излучения. Объект отождествляется со списком скоплений галактик с эффектом Сюняева-Зельдовича из соответствующего каталога миссии Planck. Совместный результат диссертанта из работы [A9].

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 приносят 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.

Список радиоисточников каталога WENSS — кандидатов, находящихся в скоплениях галактик с эффектом Сюняева-Зельдовича приведен в Таблице 5.2.

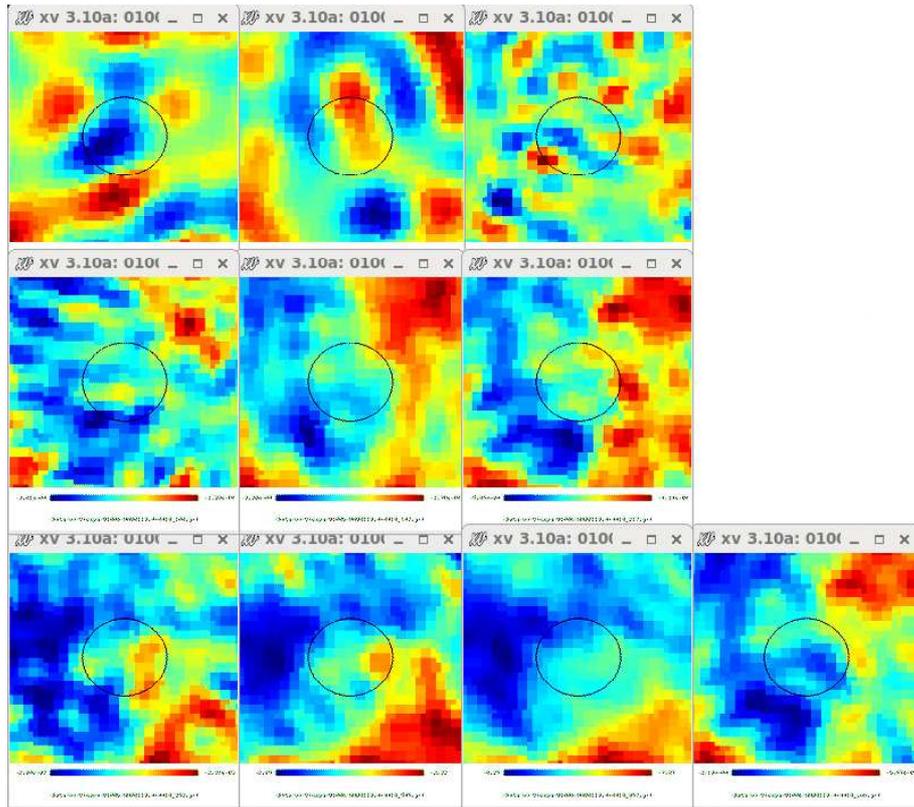


Рис. 5.9: Изображения области размером $30' \times 30'$ вокруг радиоисточника WNB 0119.4+4418 из каталога WENSS на картах космической миссии Planck соответственно справа налево сверху вниз на частотах 30, 44, 70, 100, 143, 217, 353, 545, 857 ГГц, а также (последняя картинка) — на карте реликтового излучения. Объект отождествляется со списком скоплений галактик с эффектом Сюняева-Зельдовича из соответствующего каталога миссии Planck. Совместный результат диссертанта из работы [A9].

5.5 Заключение

Таким образом, можно отметить, что проблема неполноты каталогов решается при помощи новых алгоритмов и программ, чувствительных к топологическим, статистическим и спектральным характеристикам многочастотных карт космических миссий. В данной работе для решения задач поиска новых СЗ-объектов мы применили естественный подход, основанный на соотношении сигналов в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах, но в направлении на радиоисточники, которые могут являться признаками существования скоплений галактик. Для анализа мы использовали данные по радиоисточникам каталога WENSS в диапазоне прямых восхождений $0^h \leq \alpha < 2^h$ и склонениях $28^\circ < \delta < 76^\circ$ на эпоху каталога, содержащих астрометрическую (координаты) и астрофизическую (плотности потока) информацию на частоте 326 ГГц, для 16364 объектов.

После автоматической процедуры селекции потенциальных кандидатов были отобраны 1778 объектов (9.9% от общего списка), из которых с помощью визуальной инспекции был

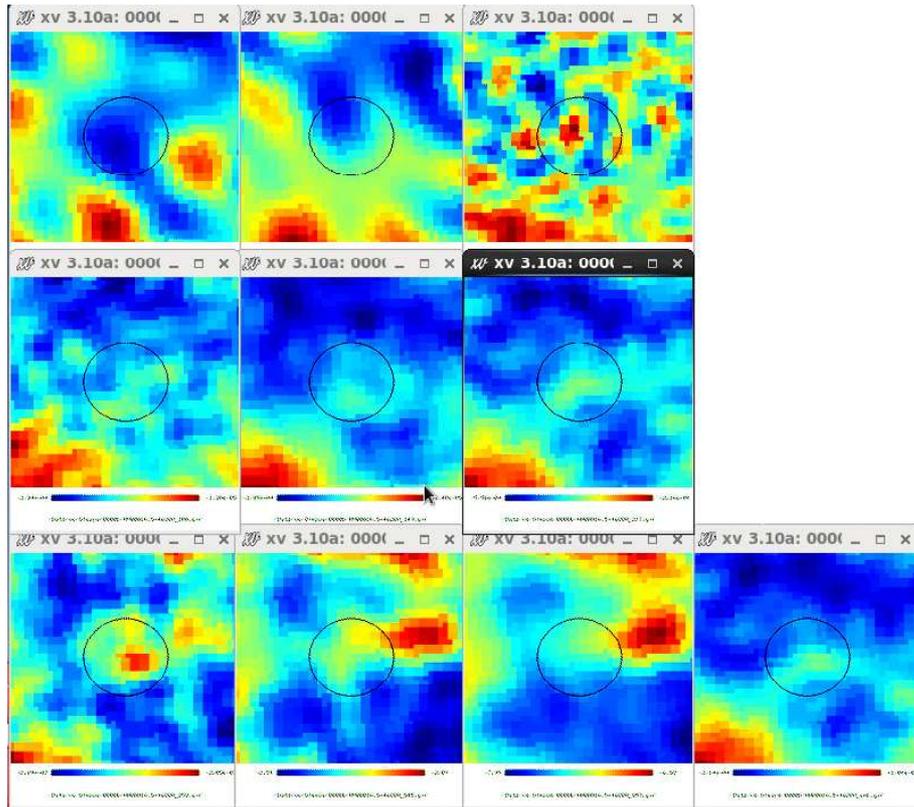


Рис. 5.10: Изображения области размером $30' \times 30'$ вокруг радиоисточника WNB 0016.5+4628 из каталога WENSS на картах космической миссии Planck соответственно справа налево сверху вниз на частотах 30, 44, 70, 100, 143, 217, 353, 545, 857 ГГц, а также (последняя картинка) — на карте реликтового излучения. Новый объект — кандидат в скопление с эффектом Сюняева-Зельдовича. Совместный результат диссертанта из работы [A9].

отмечен 381 источник (2.1% от общего списка) с наиболее типичными признаками наличия эффекта. Любопытно отметить, что метод позволил обнаружить 21 из 28 источников Planck, которые вошли в соответствующий каталог миссии, а визуальный контроль, основанный на оценке контраста эффекта оставил из них 6. Отметим, что список объектов, не представленных в данной работе из-за “зашумленности” карты флуктуациями СМВ, содержится в дополнительном списке у авторов статьи. Предварительные оценки показывают, что количество объектов с эффектом Сюняева-Зельдовича при тщательном анализе карт микроволнового фона может возрасти до десятков тысяч, что в несколько раз превышает число объектов, полученных по отождествлениям с обзорами SDSS и WISE [202]. Важно отметить, что предложенный метод поиска скоплений галактик с СЗ-эффектом по радиоисточникам также позволит искать похожие объекты с большими красными смещениями ($z > 1$), которые не видны в [202] в силу селекционных эффектов.

Отобранные источники в дальнейшем могут быть использованы для оптического исследования окружения, оценок массы и других космологических свойств для проверок следствий стандартной космологической модели. Кроме того, новые списки протяжен-

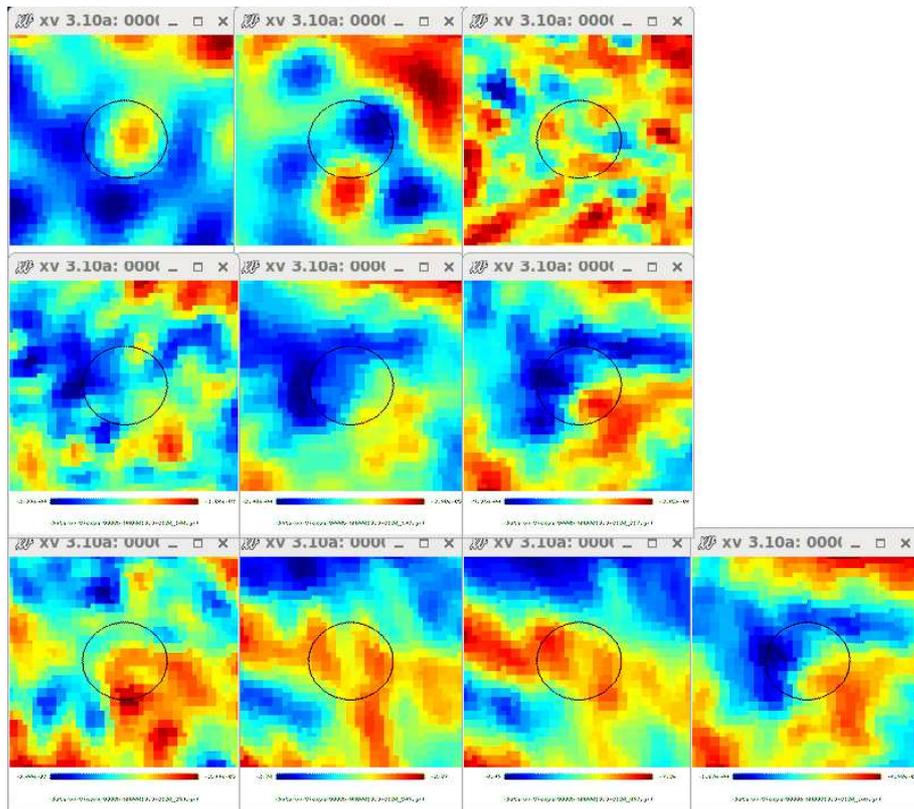


Рис. 5.11: Изображения области размером $30' \times 30'$ вокруг радиосточника WNB 0019.3+3120 из каталога WENSS на картах космической миссии Planck соответственно справа налево сверху вниз на частотах 30, 44, 70, 100, 143, 217, 353, 545, 857 ГГц, а также (последняя картинка) - на карте реликтового излучения. Новый объект — кандидат в скопление с эффектом Сюняева-Зельдовича. Совместный результат диссертанта из работы [A9].

ных радиосточников в микроволновом диапазоне дают новую информацию для учета при моделировании распределения протяженных радиосточников на полной сфере [203]. Исследования окружения радиосточника каталога WENSS других диапазонов прямых восхождений, а также других радионастрономических обзоров, продолжаются.

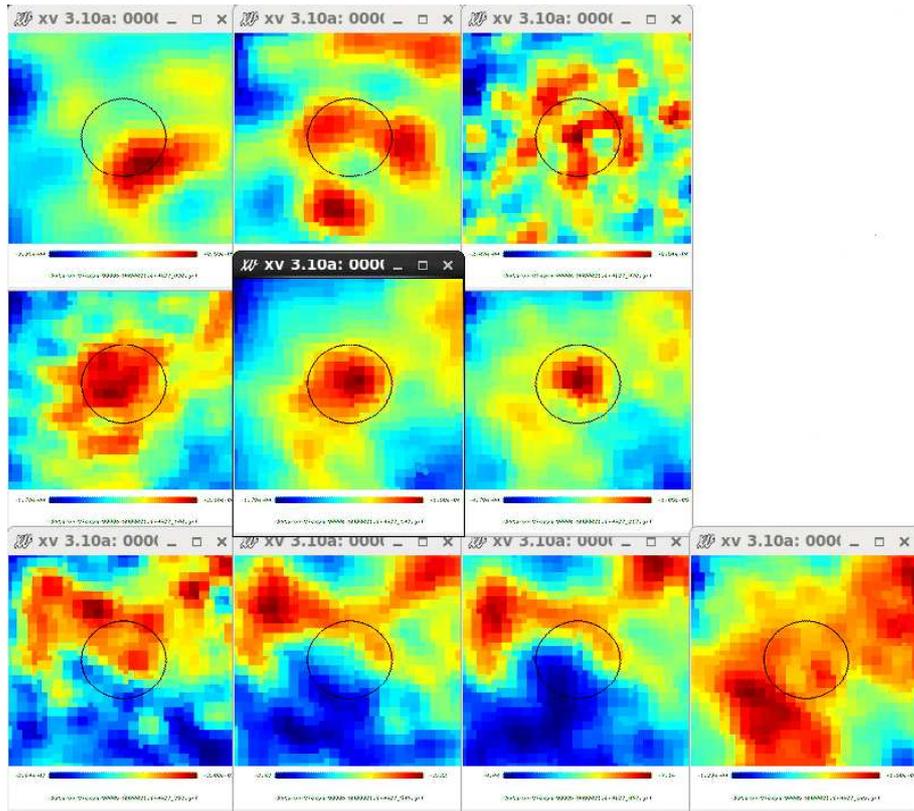


Рис. 5.12: Изображения области размером $30' \times 30'$ вокруг радиоисточника WNB0021.6+5627 из каталога WENSS на картах космической миссии Planck соответственно справа налево сверху вниз на частотах 30, 44, 70, 100, 143, 217, 353, 545, 857 ГГц, а также (последняя картинка) - на карте реликтового излучения. Радиоисточник наблюдается на всех картах. Совместный результат диссертанта из работы [A9].

Таблица 5.2: Список отобранных источников с наличием эффекта Сюняева-Зельдовича из каталога WENSS в диапазоне прямых восхождений $0^h \leq \alpha < 2^h$ на эпоху каталога WENSS (1950.0). В столбцах таблицы приведены имя радиоисточника из каталога WENSS (индекс 's' указывает на наличие отождествления в [201], индекс 'p' — в [200]), экваториальные координаты на эпоху 2000.0, величину анизотропии температуры на карте CMB SMICA ($20 < \ell \leq 2500$) и значение спектрального индекса на частоте 1.4 ГГц. Совместный результат диссертанта из работы [A9].

Имя WENSS	R.A.+DEC hhmmss+ddmmss	δT , $10^{-6}K$	Sp.In.
WNB0000.0+3207	000236+322429	-2467	-0.75

WNB0000.1+4016	000244+403253	867	-0.91
WNB0000.3+3537 ^s	000253+355410	-866	-0.49
WNB0000.5+3038 ^s	000304+305457	-624	-0.95
WNB0001.0+3849	000337+390622	-1742	-0.84
WNB0001.1+3439	000345+345618	-98	0.20
WNB0001.1+4651	000342+470834	213	-0.00
WNB0001.2+3358	000348+341532	-611	-1.11
WNB0001.2+3416C ^s	000353+343444	-660	-0.90
WNB0001.2+3755	000351+381204	92	-0.54
WNB0001.2+3803B	000352+382053	-473	-1.62
WNB0001.6+3455	000414+351240	-381	-0.83
WNB0001.8+3002	000425+301852	194	-0.92
WNB0001.8+4134	000425+415135	-565	-0.80
WNB0001.8+5244	000425+530054	-1406	-0.60
WNB0001.9+5247	000432+530427	-1468	-0.53
WNB0002.0+2905	000435+292228	851	-0.84
WNB0002.0+2943	000435+300030	928	-0.80
WNB0002.2+3145	000448+320152	-705	-0.96
WNB0002.2+3425	000452+344240	-359	-0.73
WNB0002.3+3617	000453+363431	191	-1.18
WNB0002.5+4804	000508+482139	253	-0.74
WNB0002.7+3407	000522+342408	-488	-1.36
WNB0002.8+4935	000524+495148	-1249	-0.76
WNB0002.8+4958	000527+501516	-1289	-1.01
WNB0002.9+2934	000530+295052	677	-0.84
WNB0003.0+3447	000537+350437	253	-0.50
WNB0003.0+4709	000539+472641	105	-0.86
WNB0003.2+4243	000552+430013	-351	-0.13
WNB0003.3+3322	000557+333916	518	-0.79
WNB0003.4+4244	000603+430127	-351	0.00
WNB0003.4+4614	000602+463136	69	-1.47
WNB0003.5+3413	000610+342948	-502	-2.01
WNB0003.6+3326	000616+334328	1054	-1.16
WNB0003.7+5324	000621+534132	-1932	-0.72
WNB0004.5+4416	000710+443316	147	-0.82
WNB0004.8+3510	000726+352703	290	-0.80
WNB0005.2+5955	000750+601226	-1879	-0.99
WNB0005.4+4057	000801+411402	358	-1.23
WNB0005.4+4608	000805+462454	502	-0.89

WNB0005.8+3815	000825+383225	-911	-0.62
WNB0005.9+4104	000833+412048	-47	-0.32
WNB0006.4+2941	000901+295806	505	-0.69
WNB0006.4+4754	000900+481118	-305	-1.19
WNB0006.8+3729	000925+374555	-2109	-0.62
WNB0006.8+4744	000927+480129	282	-1.25
WNB0007.3+3015 ^s	000953+303203	-1271	-0.40
WNB0007.5+3124 ^s	001006+314043	-926	-1.26
WNB0007.6+4629	001015+464621	2051	-0.54
WNB0007.8+3126	001025+314255	-698	-0.41
WNB0008.6+3159B	001120+321522	-638	-0.69
WNB0009.0+3203 ^{s,p}	001141+322015	-756	-0.56
WNB0009.0+3601	001139+361743	-417	-0.30
WNB0009.1+3209	001145+322542	-469	-0.93
WNB0010.2+4016	001253+403247	-1376	-0.85
WNB0010.2+4347	001255+440406	-1321	-1.33
WNB0010.2+4529	001251+454616	-715	-2.15
WNB0010.2+4611	001253+462826	515	-0.84
WNB0010.3+5237	001259+525427	-639	-0.94
WNB0010.4+3013	001303+303021	-1769	-1.12
WNB0010.6+4750	001316+480735	-1061	-0.66
WNB0011.7+3055	001422+311142	-989	-0.61
WNB0012.1+4809A	001440+482516	-981	-1.04
WNB0012.1+4809B	001447+482618	-981	-1.02
WNB0012.4+4531	001504+454804	-1200	-0.97
WNB0012.6+2957	001516+301418	-536	-0.69
WNB0012.7+4929	001523+494560	802	-0.64
WNB0013.1+3225	001543+324214	591	-0.53
WNB0013.2+3358	001549+341522	-329	-1.06
WNB0013.2+5024	001555+504125	877	-1.20
WNB0013.2+5424	001555+544127	-317	-1.26
WNB0013.3+3348	001560+340521	-231	-0.85
WNB0013.3+5021	001558+503829	922	-0.96
WNB0013.4+3227	001604+324432	483	-0.50
WNB0013.7+5140	001624+515731	775	-0.94
WNB0013.9+3845	001636+390154	-409	-0.46
WNB0014.0+3506	001640+352253	250	-0.20
WNB0014.1+3920	001649+393720	-487	-0.93
WNB0014.1+7449	001657+750541	1151	0.66

WNB0014.2+3931	001654+394812	-468	-0.94
WNB0014.2+5719	001656+573551	391	0.00
WNB0014.9+4509	001737+452623	-980	-0.79
WNB0014.9+7523	001752+754038	-217	-0.70
WNB0015.6+3132 ^s	001816+314915	-1552	-0.87
WNB0016.0+3023	001840+304025	-1452	-0.63
WNB0016.2+3540	001851+355717	-1105	-0.88
WNB0016.4+3830	001904+384655	-534	-0.82
WNB0016.5+3256C	001921+331319	-14	0.11
WNB0017.4+4313	002007+433009	-1372	-1.00
WNB0017.8+3050	002025+310654	-2104	-0.94
WNB0018.0+4521	002041+453744	-391	-0.58
WNB0018.7+4251	002126+430745	-2022	-0.76
WNB0018.7+4737	002122+475430	241	-0.95
WNB0018.8+3425A	002124+344445	1200	-0.39
WNB0018.8+3425 ^s	002126+344232	1033	-0.85
WNB0018.8+3459B ^p	002128+351719	-1697	-0.75
WNB0019.1+4311	002148+432825	-1938	-1.00
WNB0019.2+4358	002152+441527	-477	-0.95
WNB0019.6+4739	002221+475617	241	-0.97
WNB0020.0+4402A	002232+441817	-368	-0.78
WNB0020.1+3252	002248+330906	881	-0.58
WNB0020.4+3649	002307+370553	-1207	-0.76
WNB0020.9+3710	002336+372659	-1698	-1.05
WNB0021.1+4915	002351+493147	48	-0.84
WNB0021.4+4038	002404+405521	-662	-0.63
WNB0021.5+3702 ^s	002412+371845	-2039	-0.85
WNB0021.7+5815	002429+583211	120	-0.63
WNB0022.0+3012	002442+302926	-2300	-0.86
WNB0022.2+4102	002455+411905	-523	-0.68
WNB0022.4+3124	002503+314126	-1022	-0.68
WNB0022.4+4038	002505+405529	-662	-0.61
WNB0022.6+3354	002520+341108	1378	-0.58
WNB0023.3+4153	002602+420940	-462	-1.47
WNB0024.0+4839	002645+485555	1317	-0.60
WNB0024.1+3008	002645+302535	-2428	-0.75
WNB0024.3+3407	002660+342433	667	-0.51
WNB0024.5+4618	002716+463457	-99	-0.69
WNB0024.6+4230A	002716+424515	-1215	0.96

WNB0024.6+4230	002718+424659	-1591	-1.24
WNB0024.6+4230B	002719+424749	-1591	-1.21
WNB0024.9+3811	002734+382736	-712	-0.41
WNB0025.0+3146	002744+320317	-1840	-1.58
WNB0025.0+4205	002744+422144	-1095	-1.02
WNB0025.8+3928	002834+394441	-994	-0.98
WNB0025.8+3931	002831+394826	-1137	-0.77
WNB0026.2+4616	002859+463308	-67	-0.57
WNB0026.7+3016	002925+303328	-1692	-0.60
WNB0026.9+4405	002937+442211	28	-0.84
WNB0027.0+3932	002944+394840	941	-0.73
WNB0027.1+7135	003010+715147	159	-0.33
WNB0027.2+4143	002955+420025	-74	-1.51
WNB0027.3+4659	003006+471543	-683	-0.20
WNB0027.4+4624	003012+464036	-405	-0.41
WNB0027.7+4035	003025+405233	185	-0.14
WNB0027.9+4220	003040+423706	513	-0.79
WNB0027.9+5847	003043+590420	-1284	-0.65
WNB0028.0+3418A	003040+343601	208	-0.44
WNB0028.0+3418	003045+343445	110	-0.93
WNB0028.7+4923	003127+494023	-233	-1.10
WNB0028.9+5337	003143+535401	-956	-0.85
WNB0029.0+5332	003152+534907	-799	-0.65
WNB0029.1+3744	003150+380103	431	-0.18
WNB0029.6+4507	003219+452403	223	-0.16
WNB0029.8+3605	003233+362212	-836	0.58
WNB0030.3+3054	003301+311049	-684	-1.16
WNB0030.5+3059	003312+311630	-799	0.37
WNB0030.8+3721	003330+373740	-1180	-0.70
WNB0030.8+3910	003333+392728	-939	-1.44
WNB0030.9+4847	003342+490338	774	-0.09
WNB0031.0+3049	003344+310546	-971	-1.18
WNB0031.2+5254	003401+531118	-2138	-0.46
WNB0031.3+3946	003406+400251	59	-0.45
WNB0031.6+4139	003422+415557	-611	-0.95
WNB0031.7+4019	003429+403554	-555	-0.85
WNB0031.9+3507A ^s	003436+352353	-663	-0.45
WNB0032.1+5116	003453+513322	-797	-0.49
WNB0033.0+2933	003540+294945	-188	-1.01

WNB0033.5+3029	003610+304533	-648	-0.79
WNB0034.2+3530	003656+354637	202	-1.52
WNB0034.2+4339	003658+435618	-603	-1.19
WNB0034.3+3030	003659+304632	-916	-1.12
WNB0034.5+3215A	003709+323041	-1292	-0.93
WNB0034.5+3215	003711+323216	-1423	-0.98
WNB0034.5+3418	003716+343452	1201	-0.64
WNB0034.5+4400	003716+441726	-906	-0.66
WNB0034.8+4526	003733+454308	-364	-0.81
WNB0035.8+3012	003830+302858	-474	-0.98
WNB0035.9+3701	003838+371805	-510	-1.09
WNB0036.2+4138	003857+415440	-1512	-0.53
WNB0036.2+4418	003900+443526	847	-1.10
WNB0036.3+3221A	003901+323612	-862	-1.00
WNB0036.3+3221B	003909+323942	-529	-1.14
WNB0036.4+3636	003906+365254	-1223	-0.33
WNB0036.7+3216	003924+323244	-730	-1.06
WNB0036.7+4320	003929+433651	-698	-0.64
WNB0036.9+4138	003940+415507	-406	-0.81
WNB0037.5+4640	004018+465715	-685	-0.91
WNB0037.7+3539	004028+355611	505	-0.91
WNB0037.7+3805	004026+382132	-94	-0.82
WNB0037.9+4157	004044+421331	-658	-0.79
WNB0038.2+3310	004056+332632	-32	-0.71
WNB0038.6+3802	004119+381903	-128	-0.87
WNB0039.3+3642A ^s	004155+365857	-1132	0.26
WNB0039.3+3642 ^s	004202+365925	-1132	-0.93
WNB0039.5+3218	004216+323447	-1035	-0.14
WNB0039.6+3110	004222+312644	345	-1.34
WNB0039.7+4814	004231+483115	-340	-0.81
WNB0040.0+5720	004253+573638	-825	-0.83
WNB0040.4+3315	004308+333157	-1179	-0.87
WNB0040.7+3806	004331+382240	-105	0.45
WNB0040.9+3452	004339+350913	-207	-0.42
WNB0041.2+3346	004359+340303	-961	-1.02
WNB0041.9+4732	004447+474831	-1123	-0.60
WNB0042.1+3436	004452+345258	-23	-0.70
WNB0042.1+4732	004458+474842	-1123	-0.63
WNB0042.6+4653	004528+470925	-181	-0.53

WNB0042.9+4657	004542+471412	205	-0.63
WNB0042.9+5111	004549+512821	-387	-0.80
WNB0043.3+4444	004606+450113	-2875	-0.74
WNB0043.6+3104	004620+312116	-405	-0.25
WNB0043.8+3453	004631+351006	-272	0.23
WNB0044.0+4902	004653+491906	-2242	-1.16
WNB0044.1+3811 ^s	004653+382731	-1695	-0.79
WNB0044.4+3901	004712+391818	-447	-0.68
WNB0044.4+4908	004717+492511	-2380	-0.35
WNB0044.6+7431	004803+744741	-860	-1.16
WNB0044.7+3358	004730+341432	-1324	-1.68
WNB0044.7+3858	004730+391513	-629	-0.34
WNB0044.9+3011	004737+302800	90	-0.51
WNB0045.2+5258	004806+531443	550	-0.64
WNB0045.4+3356	004808+341307	-1203	-0.59
WNB0045.5+3247	004816+330403	68	-0.12
WNB0045.6+7437	004904+745403	-717	-0.97
WNB0045.8+3958 ^s	004836+401425	-602	-0.51
WNB0046.7+3532	004930+354909	-810	-0.59
WNB0047.0+4038	004948+405422	307	-0.68
WNB0047.2+3222	004957+323850	-301	0.05
WNB0047.2+3445	004959+350159	-976	-0.37
WNB0047.8+3314	005035+333020	-517	-0.67
WNB0047.9+3756	005045+381313	-1177	-0.88
WNB0048.0+5802	005059+581907	-153	-1.30
WNB0049.0+3253	005149+330951	-36	-0.63
WNB0049.0+3630	005145+364713	-696	-0.59
WNB0049.4+4217	005216+423326	813	-1.03
WNB0049.5+3836A	005212+385154	-1085	0.18
WNB0049.5+3836B	005219+385307	-1093	-0.75
WNB0049.7+4801	005235+481738	-2034	-0.55
WNB0049.8+5355	005242+541157	-204	-0.06
WNB0050.3+4731	005309+474800	-1037	0.20
WNB0050.6+2921	005324+293735	-846	-1.28
WNB0050.9+4039	005342+405529	-1148	-0.53
WNB0053.6+3544	005626+360020	-1253	-1.19
WNB0054.6+5034	005731+505019	358	-0.38
WNB0056.3+4705	005913+472141	-2511	-1.34
WNB0056.4+3748	005913+380429	-356	-0.04

WNB0056.4+3804	005916+382013	-13	0.74
WNB0057.4+7437	010101+745314	-1104	-0.70
WNB0057.5+3459	010020+351521	-886	-1.71
WNB0057.6+5257	010036+531360	-1418	0.77
WNB0057.7+4835	010040+485137	-2005	0.09
WNB0057.9+7440	010134+745703	-1382	-0.61
WNB0058.5+4439	010124+445519	-1253	-0.68
WNB0058.7+3846	010133+390223	32	-0.18
WNB0059.1+3129B	010155+314605	-1158	-0.98
WNB0059.1+5601	010209+561759	-3200	-0.83
WNB0059.7+3459	010233+351526	-83	-0.90
WNB0059.8+4624	010242+464010	-440	-0.32
WNB0059.8+7518	010334+753453	-916	-1.05
WNB0100.1+4557	010259+461321	-189	-1.27
WNB0100.2+5416	010316+543254	-1810	-0.37
WNB0100.3+3739	010311+375542	-1578	0.20
WNB0101.0+3310	010350+332701	-617	-1.53
WNB0101.2+3130	010360+314634	-1073	-1.19
WNB0102.0+4638	010455+465425	-241	0.21
WNB0102.9+3113	010543+313002	-542	-0.77
WNB0103.0+3107	010551+312355	-1050	-1.05
WNB0103.9+3628	010643+364411	723	-0.89
WNB0104.1+4511	010704+452713	820	-0.36
WNB0104.5+4900	010727+491617	-1029	-0.36
WNB0104.6+3331	010725+334702	-405	-0.69
WNB0105.7+3049	010831+310552	-767	-1.29
WNB0105.8+4203	010840+421945	-1547	-0.62
WNB0105.8+4500	010845+451623	1079	-1.44
WNB0105.9+5019	010852+503531	-1200	-1.19
WNB0107.3+4141 ^p	011012+415754	-900	-0.90
WNB0108.6+4741	011134+475718	-498	-1.50
WNB0108.8+3251	011140+330710	526	-0.91
WNB0109.1+2934	011152+295044	-1956	-0.39
WNB0109.4+3907	011216+392318	-812	-0.80
WNB0109.5+4948	011230+500355	-1537	-0.94
WNB0110.0+4626	011300+464218	-1163	-1.15
WNB0110.4+4403	011319+441903	161	-0.94
WNB0110.4+5055	011326+511130	827	-1.07
WNB0112.2+6057	011526+611315	-500	-0.64

WNB0113.5+3050	011619+310633	-1036	-0.88
WNB0115.1+3936	011801+395202	-662	-0.96
WNB0115.5+2953	011817+300853	-227	-1.20
WNB0115.6+4904	011840+491952	-558	-0.32
WNB0115.8+4415	011846+443060	-323	-0.95
WNB0116.3+5015	011920+503104	-332	-0.46
WNB0116.7+4008	011937+402400	-484	-0.40
WNB0117.1+3332	011956+334809	-388	-0.96
WNB0117.2+4848	012013+490356	-1595	-0.41
WNB0117.2+5216 ^p	012021+523215	-587	-0.91
WNB0117.6+3753	012028+380930	13	-0.98
WNB0117.6+4841	012041+485735	-1742	-0.83
WNB0117.9+3919	012047+393533	-413	-0.91
WNB0118.4+5629	012136+564444	-259	-0.72
WNB0118.5+4803A	012128+481845	-1445	-0.87
WNB0118.5+4803B	012134+481853	-900	-1.26
WNB0118.6+4503	012136+451908	-1520	-1.33
WNB0119.0+4508	012201+452351	-2283	-0.03
WNB0120.4+3046	012312+310219	647	-0.06
WNB0120.5+4335	012330+435130	-1684	-0.70
WNB0120.9+3738	012349+375360	-1352	-0.33
WNB0121.1+3626	012359+364153	-1975	-0.10
WNB0121.1+3713	012401+372857	239	-1.42
WNB0122.3+3256 ^s	012511+331157	-1776	-0.40
WNB0122.3+3655	012512+371104	-414	-0.09
WNB0122.5+3955 ^p	012525+401128	1138	0.23
WNB0123.0+4240	012601+425622	463	-0.92
WNB0123.2+5028	012621+504340	165	0.19
WNB0124.0+3232 ^s	012651+324806	-1430	-0.83
WNB0124.7+7158	012837+721427	-823	-1.21
WNB0125.7+3109	012837+312449	-491	-0.27
WNB0126.0+2902	012850+291759	-1983	-0.95
WNB0126.2+3542 ^p	012908+355806	-1893	-0.71
WNB0127.1+3616	013001+363136	248	0.20
WNB0127.1+4117	013005+413235	-1506	-1.14
WNB0127.9+4047	013054+410323	-817	-0.53
WNB0128.4+4321	013124+433707	-87	-1.09
WNB0129.0+4804 ^s	013207+482014	-2118	-0.43
WNB0129.1+4330	013206+434535	-913	-0.37

WNB0130.2+3404	013309+342008	-883	-0.90
WNB0131.2+7049	013504+710456	-353	-0.82
WNB0132.0+4036	013460+405205	499	-0.71
WNB0132.5+4058	013532+411415	-466	-0.51
WNB0132.6+2948 ^s	013530+300355	-897	-0.05
WNB0133.5+4137	013633+415239	-802	-0.56
WNB0134.0+2959	013654+301432	-991	-1.03
WNB0134.8+3729	013747+374423	-1919	0.56
WNB0135.0+4413	013802+442856	-967	-1.01
WNB0135.4+4403	013827+441839	232	-1.63
WNB0136.9+3343 ^s	013949+335839	-1594	-1.34
WNB0137.3+5149	014028+520444	-90	-1.19
WNB0137.7+3534	014040+354939	-1961	-1.16
WNB0137.7+7353	014160+740847	-2762	-0.23
WNB0139.3+4144	014222+415914	-697	-0.17
WNB0139.6+4236	014238+425142	-61	-1.32
WNB0139.9+4421	014256+443658	-312	-1.58
WNB0140.2+5158	014325+521316	-559	-1.24
WNB0140.3+4144	014317+415927	186	-0.98
WNB0141.6+3235	014432+325057	-675	-1.03
WNB0143.1+3644	014606+365913	-1818	-0.90
WNB0143.1+4926	014619+494153	-550	-0.96
WNB0143.3+3219	014612+323450	-1416	-0.41
WNB0143.3+4551	014627+460619	-1407	-0.60
WNB0143.4+4846	014636+490152	-1632	-1.49
WNB0143.5+4154	014634+420916	745	-0.50
WNB0143.9+3641	014656+365646	-1818	-0.60
WNB0143.9+4555	014702+460958	-1599	-0.69
WNB0143.9+5506	014715+552127	-980	-0.88
WNB0144.0+3646	014701+370136	-2056	-1.01
WNB0144.1+5503	014728+551848	-972	0.05
WNB0144.8+7026	014851+704116	-198	-1.95
WNB0145.2+5001	014823+501626	-711	-0.87
WNB0145.9+4006	014858+402135	-1025	0.43
WNB0146.3+3248A	014913+330534	219	-1.26
WNB0146.3+3248B	014916+330251	49	-0.71
WNB0150.2+3104	015307+311848	-756	-0.64
WNB0150.4+2920	015320+293543	579	-0.49
WNB0150.4+3124	015322+313925	-1384	-0.82

WNB0150.9+4148	015360+420307	-545	-0.84
WNB0151.4+4857	015439+491155	-1997	-1.27
WNB0152.1+4938	015518+495305	922	-0.49
WNB0152.3+4707	015529+472204	-1190	-1.01
WNB0152.3+6508	015607+652260	-1671	-0.94
WNB0153.0+3224	015555+323916	-82	-0.19
WNB0153.5+3100	015624+311452	-223	-1.22
WNB0153.8+3212	015644+322730	-450	-0.53
WNB0154.4+4210	015732+422449	-188	-0.64
WNB0155.3+4342	015826+435728	147	-0.78
WNB0156.1+3103	015901+311811	-127	-0.42
WNB0157.0+3537	020002+355228	407	-0.44
WNB0157.1+5225	020024+524021	-330	-0.57
WNB0157.1+5338	020029+535255	803	-1.76
WNB0157.3+5227	020040+524213	-396	-1.52
WNB0158.0+3131	020056+314615	-622	-1.09
WNB0158.1+3513	020109+352815	-287	-0.97
WNB0158.2+3138	020107+315249	-831	-0.18
WNB0158.4+3715	020128+373001	-190	-0.86
WNB0158.6+3137	020136+315132	-709	-0.51
WNB0158.6+3510	020136+352446	-190	-0.80
WNB0159.0+4311	020211+432533	-123	-0.64
WNB0159.1+3822	020210+383660	-718	-1.33
WNB0159.7+2915	020237+293002	-977	-1.26
WNB0159.7+3833A	020245+384714	-190	-1.07
WNB0159.7+3833B	020247+385007	-100	-0.29
WNB0159.7+4113	020247+412752	-1119	-0.97
WNB0159.8+3741	020253+375619	-514	-0.20
WNB0159.9+3838	020256+385238	210	-0.52

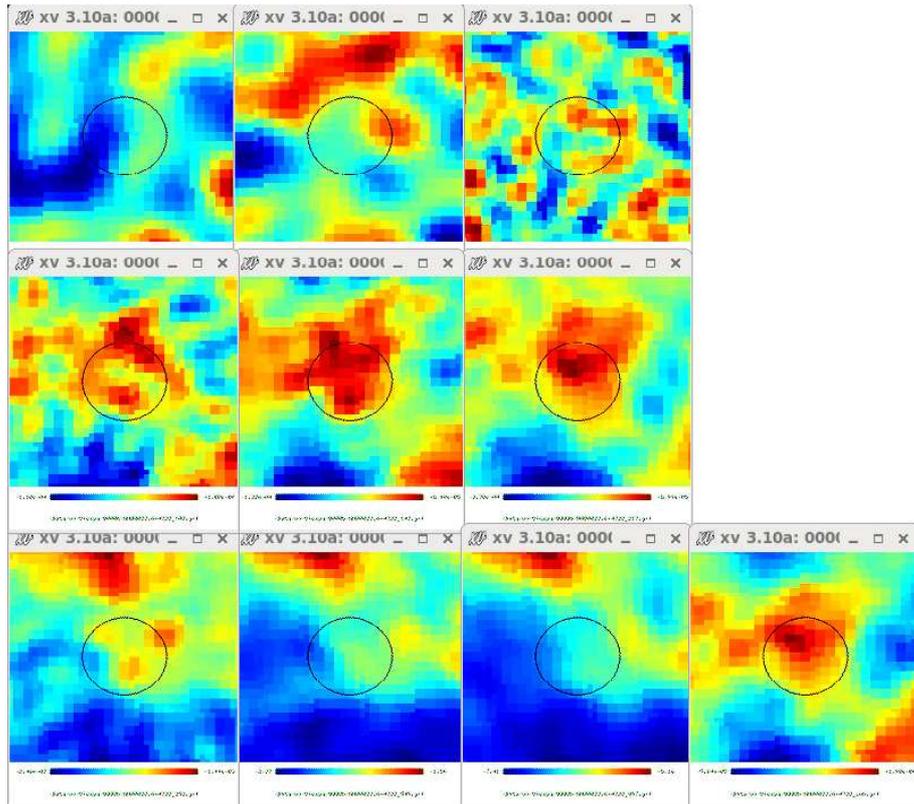


Рис. 5.13: Изображения области размером $30' \times 30'$ вокруг радиосточника WNB 0023.6+4723 из каталога WENSS на картах космической миссии Planck соответственно справа налево сверху вниз на частотах 30, 44, 70, 100, 143, 217, 353, 545, 857 ГГц, а также (последняя картинка) - на карте реликтового излучения. Радиосточник наблюдается на всех картах. Совместный результат диссертанта из работы [A9].

Заключение

В результате проведённой работы был расширен каталог ГРГ с помощью нового метода, основанного на анализе морфологии источников. Новые объекты были детально изучены и описаны, а метод нашёл применение в работах сторонних авторов [132]

Работа по исследованию ГРГ и их сравнение с другими популяциями радиоисточников выявило несколько особенностей этих объектов:

- наличие положительного сигнала в миллиметровом диапазоне;
- плоский спектр в миллиметровом диапазоне;
- сигнал в субмиллиметровом диапазоне отсутствует;
- топологические свойства на средней карте флуктуаций СВВ имеют особенности: слабый незначимый максимум находится в зоне минимума;
- значимый эффект Сюняева-Зельдовича, связанный с рассеянием фотонов СВВ на электронах плазмы джетов ГРГ [120] не наблюдается

Была построена модель протяженных радиоисточников на сфере, которая в данной работе была применена к популяции ГРГ. С помощью неё было продемонстрировано, что вклад протяженных радиоисточников в миллиметровом диапазоне должен искажать угловой спектр мощности, обусловленный эффектом Сюняева-Зельдовича.

Предложенная модель может также быть расширена для радиогалактик на больших красных смещениях (до $z \sim 6$) [133] и распределения источников, разрабатываемых для космического эксперимента "Миллиметрон" [136, 137].

Был разработан и применён новый метод быстрого поиска кандидатов в объекты с эффектом Сюняева-Зельдовича. Было показано, что количество объектов с эффектом Сюняева-Зельдовича при тщательном анализе карт микроволнового фона может возрасти до десятков тысяч, что в несколько раз превышает число объектов, полученных по отождествлениям с обзорами SDSS и WISE. Предложенный метод поиска скоплений галактик с эффектом Сюняева-Зельдовича по радиоисточникам также позволит искать похожие объекты с большими красными смещениями, которые не видны в [202] в силу селекционных эффектов.

Литература

Публикации автора по теме диссертации

- [A1] *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)
- [A2] *D. I. Solovyov, O. V. Verkhodanov*, Radio and Optical Identification of Giant Radio Galaxies from NVSS Radio Survey // *Astrophys. Bull.* – v.69 – No.2 – p.141-159 (2014)
- [A3] *Д.И. Соловьев, О.В. Верходанов*, Поиск и исследование слабых радиогалактик большого углового размера по данным обзора NVSS // *Астрон.Ж.* – т.91 – No.8 – с.592-602 (2014)
- [A4] *Д. И. Соловьев, О. В. Верходанов*, Радиогалактики с признаками слияния из списка кандидатов в гигантские радиогалактики по данным обзора NVSS // *Письма в А.Ж.* – т.40 – No.10 – с.671-680 (2014)
- [A5] *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 А.Ж.* – т.41 – No.9 – с.499-515 (2015)
- [A6] *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 // *А.Ж.* – т.93 – с.616-641 (2016)
- [A7] *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. – v.61 – p.297-298 (2017)
- [A8] *D. I. Solovyov, O. V. Verkhodanov*, Modeling of giant radio galaxy distribution over the sphere in the millimeter-wavelength range // *Astrophys. Bull.* – v.72 – Iss.3 – p.217-223 (2017)

- [A9] *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.* – v.73 – Iss.1 – p.1-21 (2018)
-

Цитируемая литература

- [10] *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.
- [11] *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.
- [12] *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.
- [13] *L. Lara, I. Marquez, W. D. Cotton, et al.* A new sample of large angular size radio galaxies - II. The optical data // *Astrophys. J.* – 2001 – Vol. 378 – p. 826.
- [14] *L. Lara, G. Giovannini, W. D. Cotton, et al.*, A new sample of large angular size radio galaxies - III. Statistics and evolution of the grown population // *Astrophys. J.* – 2004 – Vol. 421 – p. 899.
- [15] *L. Saripalli, R. W. Hunstead, R. Subrahmanyam, and E. Boyce*, A Complete Sample of Megaparsec-sized Double Radio Sources from the Sydney University Molonglo Sky Survey // *The Astronomical Journal* – 2005 – Vol. 130 – p. 896.
- [16] *C. Konar, D. J. Saikia, C. H. Ishwara-Chandra, and V. K. Kulkarni*, Radio observations of a few giant sources // *MNRAS* – 2004 – Vol. 355 – p.845.
- [17] *C. Konar, M. Jamrozy, D. J. Saikia, and J. Machalski*, A multifrequency study of giant radio sources – I. Low-frequency Giant Metrewave Radio Telescope observations of selected sources // *MNRAS* – 2008 – Vol. 383 – p. 525.
- [18] *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.
- [19] *M. Jamrozy, C. Konar, J. Machalski, and D. J. Saikia*, A multifrequency study of giant radio sources - I. Low-frequency Giant Metrewave Radio Telescope observations of selected sources // *MNRAS* – 2008 – Vol. 383 – p.525.

- [20] *J. Machalski, M. Jamrozny, S. Zola, and D. Koziel*, The new sample of giant radio sources. II. Update of optical counterparts, further spectroscopy of identified faint host galaxies, high-frequency radio maps, and polarisation properties of the sources // *Astronom. and Astrophys.* – 2006 – Vol. 454 – p. 85.
- [21] *P. Dabhade, M. Gaikwad, J. Bagchi, M. Pandey-Pommier, S. Sankhyayan, S. Raychaudhury* Discovery of giant radio galaxies from NVSS: radio and infrared properties // *MNRAS* – 2017 – Vol.463 – p.2886
- [22] *B. V. Komberg and I. N. Pashchenko*, Giant Radio Galaxies - old long-living quasars? // *Astron. Rep.* – 2009 – Vol. 53 – p. 1086.
- [23] *O. V. Verkhodanov, M. L. Khabibullina, M. Singh, et al.*, Giant radio galaxies: problems of understanding and problems for CMB? // *Proc. Intern. Conf. “Problems of Practical Cosmology”* – St.Petersburg, Russia, 2008 – Vol.2 – pp. 247-250.
- [24] *M. L. Khabibullina, O. V. Verkhodanov, M. Singh, et al.* Radio Spectra of Giant Radio Galaxies from RATAN-600 Data // *Astronomy Reports* – 2010 – Vol. 54, pp.571-577.
- [25] *M.L.Khabibullina, O.V.Verkhodanov, M.Singh, et al.*, A Second Set of RATAN-600 Observations of Giant Radio Galaxies // *Astronomy Reports* – 2011 – Vol. 55 – pp. 392-399.
- [26] *M. L. Khabibullina, O. V. Verkhodanov, M. Singh, et al.*, A study of giant radio galaxies at RATAN-600 // *Astrophys. Bull.* – 2011 – Vol. 66 – pp. 171-182.
- [27] *M. Singh, O. V. Verkhodanov, A. Pirya A., et al.*, High frequency study of few large size radio galaxies // *ASI Conf. Ser.*, eds. P.Khare & C.H.Ishwara-Chandra, In *Proc. 29th Meeting of the Astron. Soc. India* – 2011 – Vol. 3 – p. 149.
- [28] *A. V. Butenko, A. V. Glyantsev, S. A. Tyul’bashev*, Giant radio-galaxy candidates at declinations from 3.5 to 12deg // *Astron. Rep.* – 2013 – Vol. 57 – p. 1.
- [29] *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.
- [30] *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.
- [31] *J. Condon, W. D. Cotton, E. W. Greisen et al.*, The NRAO VLA Sky Survey // *Astronom. J.* – 1998 – Vol. 115, p. 1693.
- [32] *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.
- [33] *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.

- [34] . V. Verkhodanov, Multiwaves continuum data reduction at RATAN-600 // “Astronomical Data Analysis Software and Systems VI”, Eds. G.Hunt & H.E.Payne, ASP Conf. Ser., – 1997 – Vol. 125 – p. 46.
- [35] K. N. Abazajian, J. K. Adelman-McCarthy, M. A. Agueros, et al., The Seventh Data Release of the Sloan Digital Sky Survey // *Astrophys.J.Suppl.* – 2009 – Vol. 182 – p. 543-558.
- [36] 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.
- [37] Cutri, R.M., Skrutskie, M.F., Van Dyk, S., Chester, T., Evans, T., Fowler, J., Gizis, J.(IPAC/Caltech), Howard, E., Huchra, J. , Jarrett, T., Kopan, E.L., Kirkpatrick, J.D., Light, R.M, Marsh, K.A., McCallon, H. , Schneider, S., Stiening, R. , Sykes, M. , Weinberg, M. , Wheaton, W.A., Wheelock, S. 2MASS Second Incremental Data Release Catalogs and Tables // 2002
- [38] Andernach, H., Jimenez Andrade, E. F., Maldonado Sanchez, R. F., Vasquez Baez, I. R. Finding Giant Radio Galaxies in Imaging Radio Surveys // *Science from the Next Generation Imaging and Spectroscopic Surveys*, P1 – 2012.
- [39] O. Verkhodanov, H. Andernach, and N. Verkhodanova, Radio identification of decametric sources. I. Catalogue // *Bull. SAO* – 2000 – Vol. 49 – p. 53.
- [40] O. Verkhodanov, N. Verkhodanova, and H. Andernach, Radio identification of decametric sources. II // *Astrophys. Bull.* – 2009 – Vol. 64 – p. 72.
- [41] O. V. Verkhodanov, Interactive system of preparation and reduction of radio sources continuum spectra // “*Problems of modern radio astronomy*” Proc. of the 27th Radio Astronomical Conf. (in Russian) – 1997 – vol.1 – p.322.
- [42] A. Bennett, The revised 3C catalogue of radio sources // *Mem. R. Astron. Soc.* – 1962 – Vol.68 – p.163.
- [43] J. D. H. Pilkington, P. F. Scott, A survey of radio sources between declinations 20deg and 40deg // *Mem. R. Astron. Soc.* – 1965 – Vol. 69 – p. 183.
- [44] J. Bolton, F. Gardner, and M. Mackey, The Parkes Catalogue of radio Sources declination zone -20 to -60 degrees // *Australian J. Phys.* – 1964 – Vol. 17, pp. 340-372.

- [45] *O. B. Slee*, Culgoora Circular Array sources at 80 and 160 MHz // Austral. J. Phys. – 1995 – Vol.48 – p.143.
- [46] *J. N. Douglas, F. N. Bash, F. A. Bozayan et al.*, The Texas Survey of radio sources covering $-35.5^{\circ} < \delta < 71.5^{\circ}$ at 365 MHz // Astronom. J. – 1996 – Vol. 111, p. 1945.
- [47] *R. H. Becker, R. L. White, and D. J. Helfand*, The FIRST survey: Faint Images of the Radio Sky at Twenty centimeters // Astrophys. J. – 1995 – Vol. 450 – p. 559.
- [48] *C. De Breuck, Y. Tang, A. G. de Bruyn, H. Rottgering, and W. van Breugel*, A Sample of Ultra Steep Spectrum Sources Selected from the Westerbork In the Southern Hemisphere (WISH) survey // Astronom. and Astrophys. – 2002 – Vol. 394 – p. 59.
- [49] *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.
- [50] *P. C. Gregory, W. K. Scott, K. Douglas, and J. J. Condon*, The GB6 Catalog of Radio Sources // Astrophysical Journal Supplement – 1996 – Vol. 103 – p. 427.
- [51] *O. V. Verkhodanov, N. V. Verkhodanova and H. Andernach*, Radio Identification and Continuum Spectra of Decameter-Wavelength Sources // Astronomy Reports – 2003 – Vol. 47 – p. 110.
- [52] *J. E. Baldwin, R. C. Boysen, S. E. G. Hales et al.*, The 6C survey of radio sources - I. declination zone $\delta > +80$ // MNRAS – 1985 – Vol. 217 – pp. 717-730.
- [53] *M. M. McGilchrist, J. E. Baldwin, J. M. Riley et al.*, The 7C survey of radio sources at 151 MHz - two regions centres at RA $10^h 28^m$, Dec. 41° and RA $06^h 28^m$, Dec. 45° // Monthly Notices Roy. Astronom. Soc. – 1990 – Vol. 246 – p. 110.
- [54] *S. E. G. Hales, E. M. Waldram, N. Rees et al.*, A revised machine-readable source list for the Rees 38-MHz survey // Monthly Notices Roy. Astronom. Soc. – 1995 – Vol. 274 – p. 447.
- [55] *W. M. Lane, W. D. Cotton, J. F. Helmboldt, and N. E. Kassim*, The VLA Low-Frequency Sky Survey // Radio Science – 2012 – Vol. 47 – ID RS0K04.
- [56] *M. R. Griffith, A. E. Wright, B. F. Burke, et al.*, The Parkes-Mit-NRAO (PMN) surveys. III. Source catalog for the tropical survey ($-29^{\circ} < \delta < -9.5^{\circ}$) // Astrophys. J. Suppl. – 1994 – Vol. 90 – p. 179.
- [57] *T. Mauch, T. Murphy, H. J. Buttery, et al.*, SUMSS: a wide-field radio imaging survey of the southern sky - II // Monthly Notices Roy. Astronom. Soc. – 2003 – Vol. 342 – p. 1117.

- [58] *G. Colla, C. Fanti, R. Fanti et al.*, A catalogue of 3235 radio sources at 408 MHz // *Astr. Ap. Suppl.* – 1970 – Vol. 1 – p. 281-317.
- [59] *M. I. Large, L. E. Cram, and A. M. Burgess*, The Molonglo Reference Catalogue (408 MHz) // *The Observatory* – 1991 – Vol. 111, – p. 72.
- [60] *T. McGlynn, K. Scollick, N. White*, SKYVIEW: The Multi-Wavelength Sky on the Internet // “New Horizons from Multi-Wavelength Sky Surveys”, *Proc. 179th Symp. IAU*, eds B.J.McLean, D.A.Golombek, J.J.E.Hayes, and H.E.Payne; *Kluwer Acad. Publ.* – 1996 – p.465.
- [61] *H. E. Payne, R. I. Jedrzejewski and R. N. Hook*, New Features of SAOImage DS9 // *Astronomical Data Analysis Software and Systems XII*, *ASP Conf. Ser.* – 2003 – Vol. 295 – p. 489.
- [62] *J. M. Mazzarella, NED Team*, NED for a New Era // “Astronomical Data Analysis Software and Systems”, *XVI ASP Conf. Ser.* eds. R.A.Shaw, F.Hill, and D.J.Bell. – 2006 – Vol. 376 – p.153.
- [63] *Planck Collaboration: P. A. R. Ade, et al.*, Planck 2013 results. XXIX. The Planck catalogue of Sunyaev-Zeldovich sources // *Astron. Astrophys.* – 2013 (submitted).
- [64] *O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach, V. N. Chernenkov*, The CATS database to operate with astrophysical catalogs // “Astronomical Data Analysis Software and Systems VI”, eds. G.Hunt & H.E.Payne, *ASP Conf. Ser.* – 1997 – Vol. 322 – p. 46.
- [65] *O. V. Verkhodanov, B. L. Erukhimov, M. L. Monosov et al.*, Basic principles of flexible astronomical data processing system in UNIX environment // *Bull. SAO* – 1993 – Vol. 36 – p. 132.
- [66] *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.
- [67] *A. G. Doroshkevich, O. B. Verkhodanov, P. D. Naselsky, et al.*, The Gauss-Legendre Sky Pixelization for the CMB polarization (GLESP-pol). Errors due to pixelization of the CMB sky // *Intern. J. Mod. Phys.* – 2011 – Vol. 20 – p. 1053.
- [68] *T. Wang, et al.*, 4C +01.30: An X-shaped Radio Source with a Quasar Nucleus // *Astron. J.* – 2003 – Vol. 126 – p. 113.
- [69] *Liu, F. K.*, X-shaped radio galaxies as observational evidence for the interaction of supermassive binary black holes and accretion disc at parsec scale // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 2004 – Vol. 347 – p. 1357-1369.

- [70] *J.P. Leahy and P. Parma*, Multiple outbursts in radio galaxies // Extragalactic Radio Sources. From Beams to Jets. Proceedings of the 7th. I.A.P. Meeting, held at the Institut d'Astrophysique de Paris – 1992 – p.307.
- [71] , *J.P. Leahy and A. G. Williams*, The bridges of classical double radio sources // Mon. Not. R. Astron. Soc. – 1984 – Vol. 210 – p. 929.
- [72] , *D. Merritt and R. Ekers*, Tracing black hole mergers through radio lobe morphology // Science – 2002 – Vol. 297 – p. 1310.
- [73] *M.Murgia*, A multi-frequency study of the radio galaxy NGC 326 // Astron. Astrophys. – 2001 – Vol. 380 – p. 102.
- [74] , *J.E. Pringle*, Self-induced warping of accretion discs // Mon. Not. R. Astron. Soc. – 1996 – Vol. 281 – p. 357.
- [75] *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.
- [76] *C. L. Bennett, R. S. Hill, G. Hinshaw et al.*, First-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Foreground Emission // Astrophys. J. Suppl. – 2003 – Vol. 148 – p. 97.
- [77] *Planck Collaboration: P. A. R. Ade, et al.*, Planck 2013 results. I. Overview of products and scientific results // Astron. & Astrophys. – 2013 (submitted).
- [78] *Planck Collaboration* Planck 2015 results. I. Overview of products and results // Astron. & Astrophys. – 2015 (submitted).
- [79] *K. K. Schaffer, T. M. Crawford, K. A. Aird, et al.*, The First Public Release of South Pole Telescope Data: Maps of a 95 deg^2 Field from 2008 // Astrophys. J. – 2011 – Vol. 743 – p. 90.
- [80] *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.
- [81] *Planck Collaboration: P. A. R. Ade, N. Aghanim, C. Armitage-Caplan, et al.*, Planck 2013 results. XVI. Cosmological parameters // Astron. Astrophys. – 2014 (accepted).
- [82] *Planck Collaboration: P. A. R. Ade, et al.*, Planck 2013 results. XX. Cosmology from Sunyaev-Zeldovich cluster counts // Astron. Astrophys. – 2013 (accepted).
- [83] *Planck Collaboration: P. A. R. Ade, N. Aghanim, F. Argüeso, et al.* Planck 2013 results. XXVIII. The Planck Catalogue of Compact Sources // Astron. Astrophys. – 2014 (accepted).

- [84] *Planck collaboration: P. A. R. Ade, et al.* Planck 2013 results. XII. Component separation // *Astron. Astrophys.* – 2013 (submitted).
- [85] *Yu. N. Parijskij, N. N. Bursov, N. M. Lipovka, et al.*, VizieR Online Data Catalog: RATAN-600 7.6 cm catalog of radio sources // *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* – 1991 – Vol. 87 – p. 1.
- [86] *Ю.Н.Парийский и Д.В.Корольков* Эксперимент Холод . Первый глубокий обзор неба с помощью телескопа РАТАН-600 // *Итоги Науки и Техники. Астрофизика и космическая физика*, ред. Р.А.Сюняев Серия Астрономия. (ВИНИТИ, Москва) – 1986 – т.31 – с.73.
- [87] *M. Goss, et al.*, Investigation of the RATAN-600 steep-spectrum (alpha is greater than 1.1) radio source sample-VLA observations and optical identifications // *Astron. Rep.* – 1992 – Vol. 69 – p. 673.
- [88] *A. I. Kopylov, et al.*, Optical identifications of a subsample of steep spectrum radio sources from the RC catalog using the 6-m SAO telescope - Optical observations // *Astron. Rep.* – 1995 – Vol. 72 – p. 613.
- [89] *Yu. N. Parijskij, et al.*, Investigation of RATAN-600 RC radio sources // *Bull. SAO* – 1996 – Vol. 40 – p. 5.
- [90] *Yu. N. Parijskij, et al.*, Completion of the optical identification of RC catalog objects with ultra steep spectra and estimation of their redshifts // *Astron. Rep.* – (1998) – Vol. 42 – p. 425.
- [91] *T. Pursimo, et al.*, Optical morphology of distant RATAN-600 radio galaxies from subarcsecond resolution NOT images // *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* – 1999 – Vol. 134 – p. 505.
- [92] *N. S. Soboleva, E. K. Majorova, O. P. Zhelenkova, et al.*, RATAN-600 7.6-cm deep sky strip surveys at the declination of the SS433 source during the 1980–1999 period. Data reduction and the catalog of radio sources in the right-ascension interval $7h \leq R.A. \leq 17h$ // *Astrophys. Bull.* – 2010 – Vol. 65 – p. 42.
- [93] *O. V. Verkhodanov, et al.*, Results of investigation of radio galaxies of the survey Cold : photometry, colour redshifts and the age of the stellar population // *Bull.SAO* – 2001 – Vol. 52 – p. 5.
- [94] *Yu. N. Parijskij, N. N. Bursov, N. M. Lipovka, et al.*, The RATAN-600 7.6 cm catalogue of radio sources within the interval 22h - 4h at declination of SS 433 // *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* – 1992 – Vol. 96 – p. 583.

- [95] Ю. Н. Парийский и Д. В. Корольков, Эксперимент Холод . Первый глубокий обзор неба с помощью радиотелескопа РАТАН-600 // Итоги Науки и Техники. Астрофизика и космическая физика под ред. Сюняева Р.А. Серия Астрономия., (ВИНИТИ, Госкомитет по науке и технике, Москва – 1986 – Vol. 31 – p. 73.
- [96] O. P. Zhelenkova and A. I. Kopylov, Analysis of a sample of RC catalog objects in the region overlapping with the areas covered by FIRST and SDSS surveys. II: Optical identification with the SDSS survey and USNO-B1 and 2MASS catalogs // *Astrophys.Bull.* – 2009 – Vol. 64 – p. 109.
- [97] O. P. Zhelenkova and A. I. Kopylov, Analysis of the RC catalog sample in the region overlapping with the regions of the FIRST and SDSS surveys: I. Identification of sources with the VLSS, TXS, NVSS, FIRST, and GB6 catalogs // *Astrophys.Bull.* – 2008 – Vol. 63 – p. 346.
- [98] O. P. Zhelenkova, N. S. Soboleva, E. K. Majorova and A. V. Temirova, Identification and properties of host galaxies of RCR radio sources // *Astrophys. Bull.* – 2013 – Vol. 68 – p. 26.
- [99] 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.
- [100] 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.
- [101] 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.
- [102] O.V.Verkhodanov, E.K.Maiorova, O.P.Zhelenkova, D.I.Solovyov, and M.L.Khabibullina, Sources of the RCR catalog with normal and flat spectra according to data from the Planck microwave survey // *Astronomy Reports* – 2016 – Vol. 60 – p. 630.
- [103] E. Bertin and S. Arnouts, SExtractor: Software for source extraction // *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* – 1996 – Vol. 117 – p. 393.
- [104] R. J. Hanisch, A. Farris, E. W. Greisen, et al., Definition of the Flexible Image Transport System (FITS) // *Astron. Astrophys.* – 2001 – Vol. 376 – p. 359.
- [105] A. Lewis, A. Challinor and A. Lasenby, Efficient Computation of Cosmic Microwave Background Anisotropies in Closed Friedmann-Robertson-Walker Models // *Astrophys. J.* – 2000 – Vol. 538 – p. 473.

- [106] *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.
- [107] *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.
- [108] *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.
- [109] *C. Tadhunter, D. Dicken, R. Morganti, et al.* The dust masses of powerful radio galaxies: clues to the triggering of their activity // *MNRAS* – 2014 – Vol. 445 – L51.
- [110] *Planck Collaboration* Planck 2015 results. IX. Diffuse component separation: CMB maps // *Astrophys. Astrophys.* – 2015 (submitted).
- [111] *Planck Collaboration* Planck 2015 results. XIII. Cosmological parameters Planck Collaboration // *Astron. Astrophys.* – 2015 (submitted).
- [112] *Planck Collaboration*, Planck intermediate results. XXXIX. The Planck list of high-redshift source candidates // *Astron. Astrophys.* – 2015 (submitted).
- [113] *K. M. Górski, E. Hivon, A. J. Banday, et al.* HEALPix: A Framework for High-Resolution Discretization and Fast Analysis of Data Distributed on the Sphere // *Astrophys. J.* – 2005 – Vol. 622 – p. 759.
- [114] *Planck Collaboration*, Planck 2015 results. XXV. Diffuse, low-frequency Galactic foregrounds // *Astrophys. Astrophys.* – 2016 – Vol. 594 – A25.
- [115] *Planck Collaboration*, Planck 2015 results. XV. Gravitational lensing // *Astron. Astrophys.* – 2016 – Vol. 594 – p. 15.
- [116] *O. V. Verkhodanov, M. L. Khabibullina, M. Singh, et al.*, Giant radio galaxies: problems of understanding and problems for CMB ? // *Proc. Intern. Conf. “Problems of Practical Cosmology”* (St.Petersburg, Russia, 2008), Eds. Yu.V. Baryshev, I.N.Taganov and P. Teerikorpi (Russian Geograph. Soc., St.Petersburg) – 2008 – Vol. 2 – p. 247.
- [117] *L. Saripalli, R. W. Hunstead, R. Subrahmanyan, and E. Boyce*, A complete sample of megaparsec-size double radio sources from sumss // *Astronom. J.* – 2005 – Vol. 130 – p. 896.
- [118] *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.

- [119] *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.
- [120] *S. Colafrancesco and P. Marchegiani*, The energetics of giant radio galaxy lobes from inverse Compton scattering observations // *Astronom. and Astrophys.* – 2011 – Vol. 535 – A108.
- [121] *J.J. Condon*, Cosmological evolution of radio sources found at 1.4 GHz // *Astrophys. J.* – 1984 – Vol. 284 – p. 44.
- [122] *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.
- [123] *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.
- [124] *J.S. Dunlop and J.A. Peacock*, The Redshift Cut-Off in the Luminosity Function of Radio Galaxies and Quasars // *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* – 1990 – Vol. 247 – p. 19.
- [125]) *C.A. Jackson, J.V. Wall*, Extragalactic radio-source evolution under the dual-population unification scheme // *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* – 1999 – Vol. 304 – p. 160.
- [126] *V.K. Kapahi, V.K. Kulkarni*, VLA observations of unidentified Leiden-Berkeley Deep-Survey sources - Luminosity and redshift dependence of spectral properties // *Astronom. J.* – 1990 – Vol. 99 – p. 1397.
- [127] *I. G. McCarthy, A. M. C. Le Brun, J. Schaye, and G. P. Holder*, The thermal Sunyaev-Zel'dovich effect power spectrum in light of Planck // *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* – 2014 – Vol. 440 – p. 3645.
- [128] *D. D. Proctor*, Low-resolution pattern recognition—sorting triples in the FIRST database // *JEI*, – 2003 – Vol. 12 – p. 398.
- [129] *D. D. Proctor*, Comparing Pattern Recognition Feature Sets for Sorting Triples in the FIRST Database // *Astrophys. J. Suppl.* – 2006 – Vol. 165 – p. 95.
- [130] *D. D. Proctor*, Morphological Annotations for Groups in the First Database // *Astrophys. J. Suppl.* – 2011 – Vol. 194 – p. 31.
- [131] *A. Kuzmicz, M. Jamrozy, 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

- [132] *D. D. Proctor*, A Selection of Giant Radio Sources from NVSS // *Astrophys. J. Suppl.* – 2016 – Vol. 224 – p. 18.
- [133] *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).
- [134] *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., Пущино, ПРАО АКЦ ФИАН – 2017 – с.10.
- [135] *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., Пущино, ПРАО АКЦ ФИАН – 2017 – с.10.
- [136] *Н.С. Кардашев, И.Д. Новиков, В.Н. Лукаш, и др.* Обзор научных задач для обсерватории Миллиметрон // *УФН* – 2014 – Vol. 184, с. 1319.
- [137] *Pilipenko S.V., Tkachev M.V., Ermash A.A. et al.*, A model of the cosmic infrared background produced by distant galaxies // *Astron.Lett.* – 2017 – Vol. 43 – p. 644.
- [138] *A. Wirth et al.*, Dumbbell galaxies and precessing radio jets // *Astronom. J.* – 1982 – Vol. 87 – p. 602.
- [139] *R.W.Hunstead et al.*, A QSO with precessing jets: 2300 – 189 // *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* – 1984 – Vol. 207 – p. 55.
- [140] *C.Cotanyi, Mexicana*, NGC 3309: An S-shaped radio galaxy in a nearby cluster // *Astron. Astrof.* – 1990 – Vol. 21 – p. 173.
- [141] *L.S.Sparke, J.S.Gallagher*, *Galaxies in the Universe* // Cambridge University Press – 2000.
- [142] *A.J.Young, A.S.Wilson, S.J.Tingay, and S.Heinz* The halo, hot spots, and jet/cloud interaction of PKS 2153-69 // *Astrophys. J.* – 2005 – Vol. 622 – p. 830.
- [143] *Chambers K.C., Miley G.K., and van Breugel W.J.M.*, Alignment of radio and optical orientations in high-redshift radio galaxies // *Nature* – 1987 – Vol. 329 – p. 604.
- [144] *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.

- [145] *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.
- [146] *S. Ilic, M. Langer, M. Douspis*, Detecting the integrated Sachs-Wolfe effect with stacked voids // *Astron. Astrophys.* – 2013 – Vol. 556 – A51.
- [147] *Planck Collaboration*; Planck 2013 results. XIX. The integrated Sachs-Wolfe effect // *Astron. Astrophys.* – 2014 – Vol. 571 – A19.
- [148] *B. P. Venemans, H. J. A. Rottgering, G. K. Miley et al.*, Protoclusters associated with $z > 2$ radio galaxies. I. Characteristics of high redshift protoclusters // *Astron. Astrophys.* – 2007 – Vol. 461 – p. 823.
- [149] *R. J. McLure et al.*, A comparative HST imaging study of the host galaxies of radio-quiet quasars, radio-loud quasars and radio galaxies // *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* – 1999 – Vol. 308 – p. 377.
- [150] *S. Rawlings and M. J. Jarvis*, Evidence that powerful radio jets have a profound influence on the evolution of galaxies // *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* – 2004 – Vol. 355 – L9.
- [151] *Willott C.J., McLure R.J., and Jarvis M.J.*, A $3 \times 10^9 M_{\odot}$ black hole in the quasar SDSS J1148+5251 at $z=6.41$ // *Astrophys. J.* – 2003 – Vol. 587 – L1.
- [152] *M.L. Khabibullina and O.V. Verkhodanov*, The Estimation of Black-Hole Masses in Distant Radio Galaxies // *Astronomy Reports* – 2011 – Vol. 55 – p. 302.
- [153] *E. Berger*, Short-Duration Gamma-Ray Bursts // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* – 2014 – Vol. 52 – p. 43.
- [154] *M. H. P. M. van Putten, G. M. Lee, M. Della Valle, et al.* On the origin of short GRBs with extended emission and long GRBs without associated SN // *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* – 2014 – Vol. 444 – L58.
- [155] *B. V. Komberg, D. I. Nagirner, I. V. Zhuravleva*, The Sunyaev-Zel'dovich effect in elliptical galaxies // *Astron. Rep.* – 2008 – Vol. 52 – p. 707.
- [156] *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.
- [157] *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.

- [158] *D. Ricci, 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.
- [159] *Amirkhanyan, V. R.* Anisotropy of the space orientation of radio sources. I: The catalog // Astrophys. Bull. – 2009 – Vol. 64 – p. 325A.
- [160] *V. R. Amirkhanyan, V. L. Afanasiev, A. V. Moiseev*, New extended radio sources from the NVSS // Astrophys. Bull. – 2015 – Vol. 70 – p. 45.
- [161] *O. V. Verkhodanov, M. L. Khabibullina*, Statistics of WMAP ILC map temperature fluctuations towards distant radio galaxies // Astrophys. Bull. – 2011 – Vol. 66 – p. 183.
- [162] *C. J. Willott, S. Rawlings, M. J. Jarvis, and K. M. Blundell*, Near-infrared imaging and the K-z relation for radio galaxies in the 7C Redshift Survey // Monthly Notices Roy. Astronom. Soc. – 2003 – Vol. 339 – p. 173.
- [163] *B. Rocca-Volmerange, D. Le Borgne D., C. De Breuck C., et al.*, The radio galaxy $K - z$ relation: $10^{12} M_{\odot}$ mass limit. Masses of galaxies from the L_K luminosity, up to $z > 4$ // Astron. Astrophys. – 2004 – Vol. 419 – p. 71.
- [164] *G. Blumenthal and G. Miley*, Spectral index dependent properties of steep spectrum radio sources // Astronom. and Astrophys. – 1979 – Vol. 80 – p. 13.
- [165] *R. D. Dagkesamanskii*, Spectral Index–Flux Density Relation for Quasars // Nature – 1970 – Vol. 226 – p. 432.
- [166] *C. de Breuck, W. van Breugel, H. J. A. Rottgering and G. Miley*, A sample of 669 ultra steep spectrum radio sources to find high redshift radio galaxies // Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser. – 2000 – Vol. 143 – p. 303.
- [167] *G. Miley and C. De Breuck*, Distant radio galaxies and their environments // Astron. Astrophys. Rev. – 2008 – Vol. 15 – p. 67.
- [168] *W. van Breugel, Carlos De Breuck, S. A. Stanford et al.*, A Radio Galaxy at $z = 5.19$ // Astrophys. J. – 1999 – Vol. 518 – p. 61.
- [169] *A. I. Kopylov, W. M. Goss, Yu. N. Pariiskii et al.*, RC J0311+0507: a candidate for superpowerful radio galaxies in the early Universe at redshift $z=4.514$ // Astronom. Lett. – 2006 – Vol. 32 – p. 433.
- [170] *Yu. N. Pariiskij, P. Thomasson, A. I. Kopylov, et al.*, Observations of the $z = 4.514$ radio galaxy RC J0311+0507 // Monthly Notices Roy. Astronom. Soc. – 2014 – Vol. 439 – p. 2314.
- [171] *O. V. Verkhodanov O.V., Yu. N. Pariiskij, and A. A. Starobinsky*, Determination of Ω_{Λ} and H_0 from photometric data of radiogalaxies // Bull. SAO – 2005 – Vol. 58, – p. 5.

- [172] *O. V. Verkhodanov, V. V. Sokolov, M. L. Khabibullina, and S.V.Karpov*, GRB Sky Distribution Puzzles // *Astrophys. Bull.* – 2010 – Vol. 65 – p. 238.
- [173] *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.
- [174] *Planck Collaboration*, Planck 2015 results. IX. Diffuse component separation: CMB maps // *Astrophys. Astrophys.* 2015(submitted).
- [175] *R. K. Sachs and A. M. Wolfe*, Perturbations of a Cosmological Model and Angular Variations of the Microwave Background // *Astrophys. J.* – 1967 – Vol. 147 – p. 73.
- [176] *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.
- [177] *M. L. Khabibullina, O. V. Verkhodanov, M. Singh*, A study of giant radio galaxies at RATAN-600 // *Astrophys. Bull.* – 2011 – Vol. 66 – p. 171.
- [178] *SDSS-III Collaboration: Christopher P. Ahn, et al.* The Ninth Data Release of the Sloan Digital Sky Survey: First Spectroscopic Data from the SDSS-III Baryon Oscillation Spectroscopic Survey // *Astrophys. J. Suppl.* – 2012 – Vol. 203 – p. 21.
- [179] *K.N.Abazajian, J.K.Adelman-McCarthy, M.A.Agueros, et al.*, The Seventh Data Release of the Sloan Digital Sky Survey // *Astrophys. J. Suppl.* – 2009 – Vol. 182 – p. 543.
- [180] *K. Vanderlinde et al.* Galaxy Clusters Selected with the Sunyaev-Zel'dovich Effect from 2008 South Pole Telescope Observations // *Astrophys. J.* – 2010 – Vol. 722 – p. 1180.
- [181] *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.
- [182] *Верходанов О.В., Парийский Ю.Н.* Радиогалактики и космология // М.:Физмалит – 2009.
- [183] *T. V. Keshelava and O. V. Verkhodanov*. Search for clustering of background objects near distant radio galaxies using the MST method // *Astrophys. Bull.* – 2015 – Vol. 70 – p. 257.
- [184] *Planck Collaboration: Ade P.A.R., et al.*, Planck 2013 results. I. Overview of products and scientific results // *Astron. Astrophys.* – 2014 – Vol. 571 – A1.
- [185] *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.

- [186] *R.A. Sunyaev and Ya.B. Zel'dovich*, The Observations of Relic Radiation as a Test of the Nature of X-Ray Radiation from the Clusters of Galaxies // *Comments Astrophys. Space Phys.* – 1972 – Vol. 4 – p. 173.
- [187] *R.A. Sunyaev and Ya.B. Zel'dovich*, The velocity of clusters of galaxies relative to the microwave background. The possibility of its measurement // *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* – 1980 – Vol. 190 – p. 413.
- [188] *K.K.Schaffer, T.M.Crawford, K.A.Aird, et al.* The First Public Release of South Pole Telescope Data: Maps of a 95 deg. Field from 2008 // *Astrophys. J.* – 2011 – Vol. 743 – p. 90.
- [189] *Planck Collaboration: P. A. R. Ade, et al.* Planck 2013 results. XXI. Power spectrum and high-order statistics of the Planck all-sky Compton parameter map // *Astron. Astrophys.* – 2014 – Vol. 571, A21.
- [190] *L.I. Gurvits, K.I. Kellermann, S. Frey*, The “angular size - redshift relation for compact radio structures in quasars and radio galaxies // *Astron. Astrophys.* – 1999 – Vol. 342 – p. 378.
- [191] *O.V.Verkhodanov, 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 (2005).
- [192] *A.I.Kopylov, W.M.Goss, Yu.N.Pariiskii, et al.* RC J0311+0507: a candidate for superpowerful radio galaxies in the early Universe at redshift $z=4.514$ // *Astronom. Lett.* – 2006 – Vol. 32 – p. 433.
- [193] *Yu.N.Parijskij, P.Thomasson, A.I.Kopylov, et al.* Observations of the $z = 4.514$ radio galaxy RC J0311+0507 // *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* – 2014 – Vol. 439 – p. 2314.
- [194] *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.
- [195] *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* – 2017 – Vol. 61 –p. 297.
- [196] *Planck Collaboration: R. Adam, et al.*, Planck 2015 results. X. Diffuse component separation: Foreground maps // *Astrophys. Astrophys.* – 2016 – Vol. 594 – A10.
- [197] *P.D.Naselsky, P.R.Christensen, P.Coles, et al.*, Understanding the WMAP Cold Spot mystery // *Astrophys. Bull.* – 2010 – Vol. 65 – p. 101.

- [198] *A.G.Doroshkevich, P.D.Naselsky, O.V.Verkhodanov, et al.*, Gauss-Legendre Sky Pixelization (GLESP) for CMB maps // *Int. J. Mod. Phys.* – 2003 – Vol. 14 – p. 275.
- [199] *O.V.Verkhodanov, Ya.V.Naiden, V.N.Chernenkov, N.V. Verkhodanova*, Database of extended radiation maps and its access system // *Astrophys.Bull.* – 2014 – Vol. 69 – p. 113.
- [200] *Planck Collaboration*, Planck 2015 results XXVII. The second Planck catalogue of Sunyaev-Zeldovich sources // *Astron. Astrophys.* – 2015 – Vol. 594 – A27.
- [201] *Z.L. Wen, J.L.Han, F.S.Liu*, A catalog of 132,684 clusters of galaxies identified from Sloan Digital Sky Survey III // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* – 2012 – Vol. 199 – p. 34.
- [202] *R. A. Burenin*, An extension of the Planck galaxy cluster catalogue // *Astron. Lett.* – 2017 – Vol. 43 – p. 507.
- [203] *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.
- [204] *Planck Collaboration*, Planck 2015 results. XXVI. The Second Planck Catalogue of Compact Sources // *Astron. Astrophys.* – 2016 – Vol. 594 – A26.
- [205] *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.
- [206] *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.
- [207] *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.
- [208] *R.G. Hine*, Multifrequency observations of 4C 39.04: a powerful giant radio galaxy // *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* – 1979 – Vol. 189 – p. 527.
- [209] *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.
- [210] *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.
- [211] *P. A. Jones*, The Giant Radio Galaxy 0319-45 (MSH 03-43) // *PASAU* – 1989 – Vol. 8 – p. 81.

- [212] *L. Saripalli, R. Subrahmanyan, 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.
- [213] *L. Saripalli, K.-H. Mack, U. Klein, et al.*, A high-frequency radio continuum investigation of giant radio galaxies. II. Observations of four objects at 2.8cm wavelength // *Astron. Astrophys.* – 1996 – Vol. 306 – p. 708.
- [214] *L. Saripalli, Gopal-Krishna, W. Reich, and H. Kuhr*, Giant radio galaxy 0503-286 // *Astron. Astrophys.* – 1986 – Vol. 170 – p. 20.
- [215] *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.
- [216] *C. Simpson, M. J. Ward, and A. S. Wilson*, Evidence for an obscured quasar in the giant radio galaxy PKS 0634-205 // *Astrophys. J.* – 1995 – Vol. 454 – p. 683.
- [217] *K. Chyzy, M. Jamrozy, S. J. Kleinman, et al.*, Redshifts measurement of distant giant radio galaxies // *Balt. Astron.* – 2005 – Vol. 14 – p. 358.
- [218] *P. Parma, H. R. de Ruiter, K.-H. Mack, et al.*, 1358+305: a giant radio galaxy at $z=0.206$ // *Astron. Astrophys.* – 1996 – Vol. 311 – p. 49.
- [219] *J. Machalski, D. Koziel-Wierzbowska, M. Jamrozy, and D.J. Saikia*, J1420-0545: The radio galaxy larger than 3C236 // *Astrophys. J.* – 2008 – Vol. 679 – p. 149.
- [220] *M. Molina, T. Venturi, A. Malizia, et al.*, IGR j1448-4008: an X-ray peculiar giant radio galaxy discovered by INTEGRAL // *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* – 2015 (submitted).
- [221] *H. J. A. Rottgering, Y. Tang, M. A. R. Bremer, et al.*, WN 1626+5153: a giant radio galaxy from the WENSS survey // *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* – 1996 – Vol. 282 – p. 1033.
- [222] *M. Molina, L. Bassani, A. Malizia, et al.*, IGR J17488-2338: a newly discovered giant radio galaxy // *Astron. Astrophys.* – 2014 – Vol. 565 – p. 2.
- [223] *L. Lara, I. Marquez, W. D. Cotton, et al.*, Restarting activity in the giant radio galaxy J1835+620 // *Astron. Astrophys.* – 1999 – Vol. 348 – p. 699.
- [224] *J. Machalski, K. T. Chyzy, and M. Jamrozy*, On the time evolution of giant radio galaxies 2002 (submitted).
- [225] *J. Machalski, M. Jamrozy, S. Zola, and D.Koziel*, The new sample of giant radio sources. II. Update of optical co counterparts, further spectroscopy of identified faint host galaxies, high-frequency radio maps, and polarisation properties of the sources // *Astron. Astrophys.* – 2006 – Vol. 454 – p. 85.

- [226] *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.
- [227] *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.