

УДК 524.827; 524.7-732

СРАВНЕНИЕ СВОЙСТВ РАДИОГАЛАКТИК РАЗНЫХ ПОПУЛЯЦИЙ ПО МИКРОВОЛНОВЫМ ДАННЫМ МИССИИ PLANCK

© 2016 О. В. Верховданов^{1*}, Д. И. Соловьев², О. С. Улахович³, М. Л. Хабибуллина¹

¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

²Санкт-Петербургский филиал Специальной астрофизической обсерватории РАН, Санкт-Петербург, 196140 Россия

³Приволжский (Казанский) федеральный университет, Казань, 420008 Россия

Поступила в редакцию 16 ноября 2015 года; принята в печать 21 марта 2016 года

Методом стэкинга исследованы области карт микроволнового фонового излучения (СМВ), построенных по данным обсерватории Planck, в окрестности различных популяций радиоисточников и гигантских эллиптических галактик. Выборки объектов включают в себя гигантские радиогалактики (ГРГ), радиоисточники, отобранные по радиоспектральному индексу и красному смещению, а также гамма-всплески, используемые как вторичная сравнительная выборка. Исследованы топологические свойства сигнала СМВ в окрестности среднего объекта популяции, а именно поиск присутствия максимумов и минимумов в средней площадке. Обнаружено отличие сигнала в окрестности ГРГ от других типов объектов.

Ключевые слова: *радиоконтинуум: галактики — гамма-всплески: общее — космический микроволновой фон — методы: анализ данных*

1. ВВЕДЕНИЕ

Открытый доступ к многочастотным картам космической миссии Planck¹ [1] позволяет провести разнообразные исследования физических и 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 три раза), более высокую чувствительность (в десять раз) и девять частотных полос, позволивших разделить компоненты излучения [2]. Все это дает возможность изучать более слабые объекты по сравнению с доступными по данным обсерватории WMAP.

Одним из методов, широко применяемых для анализа популяций слабых радиоисточников, является осреднение площадок вокруг объектов исследуемой выборки в заданном диапазоне длин волн [3–6]. Такая процедура осреднения данных для 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 положительно-го (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 — СМВ) 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 [7–9].

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

1) являются, скорее всего, результатом слияния (мерджинга) галактик в скоплениях, указывая тем самым направление на скупивание материи в крупномасштабной структуре, что отражается в микроволновом фоне посредством эффекта Сюняева–Зельдовича [10];

2) они являются родительскими галактиками для радиоисточников, тем самым давая возможность наблюдателю отбирать кандидаты в далекие ($z > 1$) скопления по радиоизлучению [11];

3) в случае регистрируемого радиоисточника они наблюдаемы на больших красных смещениях

*E-mail: vo@sao.ru

¹<http://www.rssd.esa.int/Planck/>

($z > 2$), что, в свою очередь, обусловлено присутствием в их центре СМЧД [12–15];

4) родительские gE-галактики с большим содержанием пыли видны в микроволновом диапазоне из-за присутствия мощной тепловой компоненты в распределении энергии в спектре [16];

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 [17];

5) в их окружении на больших z в субмиллиметровом диапазоне наблюдаются далекие галактики со вспышкой звездообразования [17];

6) короткие гамма-всплески, обусловленные слиянием проэволюционировавших массивных звезд [18, 19], 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 [20].

В предлагаемой работе 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 по данным литературы (см. раздел 2.1), выборку радиосточников обзора WENSS [21] в диапазоне прямых восхождений $0^h \leq RA < 2^h$, выборку далеких радиогалактик с красными смещениями $z > 0.3$ [22–24], список гигантских эллиптических галактик из работы [25], а также выборки гамма-событий из каталогов BATSE [26] и ВерроSAX [27], которые применялись в сравнительном анализе.

Работа изложена следующим образом. Сначала описываются выборки радиогалактик и объектов,

которые могут быть связаны с эллиптическими галактиками, например, гамма-всплески (GRB). 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 Заключение обсуждаются основные результаты работы.

2. ВЫБОРКИ

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

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 1.

Таблица 1. Список гигантских радиогалактик, используемых в осреднении процедурой *stacking*. Величины в скобках в столбце красных смещений — фотометрические оценки из работы [28]

Name	FR-type	Size, Mpc	z	Reference
J 000332+035114	II	2.08	0.097	[29]
J 003406-663935	II	2.0	0.1103	[30, 31]

Таблица 1. (Продолжение)

Name	FR-type	Size, Мpc	z	Reference
J 004817-830842	II	1.34	0.2591	[32]
J 005332+403059	II	1.52	0.1488	[33–35]
J 011204+493004 (3C35)	II	1.1	0.0670	[33–35]
J 011625-472218	II	1.5	0.1461	[31]
J 013936+395712 (4C39.04)	II	1.6	0.2107	[34–39]
J 014345-543029	II	1.0	0.1791	[32]
J 020033+404912 (4C40.09)	I/II	1.9	0.0827	[34, 35]
J 021309-474356 (PKS 0211-47)	II	1.6	0.2200	[40]
J 021419+325114	II	1.6	0.2605	[35]
J 023714-643006	II	2.2	0.364:	[32]
J 031305+412001	II	1.8	0.1340	[34, 35]
J 031822+682932	II	1.74	0.0901	[33, 36, 41]
J 032037-451937	II	1.3	0.9792	[31, 36, 42, 43]
J 032555-773006	II	1.7	0.2771	[32]
J 033143-771552	II	2.7	0.1456	[30–32]
J 042218+151239	I	3.98	0.409	[29]
J 043911-242215	II	1.1	0.8340	[36]
J 045258+520429 (3C130)	I	1.1	0.1090	[37, 44]
J 045908-525208	II	1.1	0.0957	[30, 31]
J 050542-284017		2.5	0.0383	[31, 45, 46]
J 051332-302850		1.2	0.0576	[30, 31]
J 063143-540730	II	1.0	0.2036	[32]
J 063634-203530 (PKS 0634-20)	II	1.2	0.0552	[40, 47]
J 065434+732036	II	1.9	0.1145	[35]
J 070202+485922	I/II	1.9	0.0650	[35]
J 070531-451312		1.1	0.1242	[30, 31]
J 070922-360134		1.0	0.1109	[31]
J 072018+283754	II	1.5	0.2705	[28, 48]
J 072519+302545	II	1.2	(0.70)	[28]
J 074844+554911 (DA240)	I/II	2.0	0.0240	[34, 35]
J 081105-680029	II	1.3	0.2311	[32]
J 081637+334754	II	1.2	(0.42)	[28]
J 082003+753837	II	2.3	0.2374	[35, 36]
J 082606+691955 (8C 0821+695)	II	3.0	0.5380	[34?]]

Таблица 1. (Продолжение)

Name	FR-type	Size, Mpc	z	Reference
J 091252+350929	II	1.58	0.2489	[28, 33, 37, 38, 48]
J 092753+351053	II	2.2	(0.55)	[28]
J 095014+731533 (4C73.08)	II	1.5	0.0581	[34, 35]
J 100604+345427 (3C236)	II	5.7	0.1005	[34–36]
J 101114+311118	II	1.7	(0.50)	[28]
J 102756-231202	II	1.1	0.3090	[36]
J 103309+564420 (HB 13)	I	2.6	0.0450	[34]
J 115549+402905	II	1.4	(0.53)	[28]
J 121159+741925 (4CT74.17)	II	1.2	0.107	[34–36]
J 121611+415938	II	1.6	0.2426	[35, 38]
J 123530+212052 (3C274.1)	II	1.0	0.4220	[36]
J 125311+404118	II	1.0	0.2302	[28, 48]
J 125435+293406	II	1.6	(0.42)	[28]
J 125913-773706	II	1.5	>0.3	[32]
J 130459-324914		1.3	0.1528	[30, 31]
J 131146+405853	II	1.0	0.0358	[34, 35]
J 131406+693657 (DA340)	II	1.3	0.1060	[34–36]
J 133035+385018	II	1.9	0.63?	[28, 48]
J 133612-801818	II	2.3	0.2478	[32]
J 134302+375834	II	3.1	0.2267	[28, 36–38]
J 135047+642916 (3C292)	II	1.1	0.7100	[36]
J 135520+292354	II	1.5	(0.43)	[28]
J 140044+301806	II	2.6	0.206	[34–38, 44, 49]
J 142027-054642	II	4.7	0.3067	[50]
J 142817+291808	II	1.9	0.0870	[28, 35]
J 142849+393853	II	1.6	(0.50)	[28]
J 144529+305142	II	1.7	0.42	[28, 48]
J 145133+335806	II	1.1	0.3251	[28, 48]
J 145306+330827	II	1.7	0.249	[28, 35, 37, 38, 48]
J 144851-400806	II	1.5	0.123	[51]
J 151331+384130	II	1.7	0.52?	[28, 48]
J 152503+334606	II	1.3	(0.47)	[28]
J 153709+842253	II	2.1	0.201	[35, 36]
J 154902-321747	I/II	1.11	0.1081	[31, 33]

Таблица 1. (Продолжение)

Name	FR-type	Size, Mpc	z	Reference
J 155212+200512 (3C326)	II	2.5	0.0895	[36–38]
J 155429+394506	II	1.1	(0.35)	[28]
J 155504+365306	II	1.3	0.2472	[28, 48]
J 160421+373106	II	1.3	0.814	[28, 48]
J 162811+514656	II	1.6	0.0547	[34, 35, 52]
J 163120+823404 (NGC 6251)	I/II	3.0	0.0247	[34, 35]
J 164908+311406	II	1.2	0.4373	[28, 48]
J 171225+355830	II	1.0	0.3357	[28, 48]
J 172515+392330	II	1.2	0.2898	[28]
J 172834-723730	II	2.2	0.4735	[32]
J 174840-233542	II	1.4	0.24	[53]
J 183514+620421	II	1.1	0.518	[54]
J 191054-704918	I	1.2	0.2172	[32]
J 191921-795942	II	1.8	0.3462	[32]
J 194709-822254	II	2.1	0.333:	[32]
J 204244+750812 (4C74.26)	II	1.6	0.1040	[34–36, 44]
J 214535+815523	II	3.7	0.1457	[35]
J 215909-721830	II	1.0	0.0974	[30–32]
J 231600-282359	II	2.2	0.2293	[33, 55, 56]

2.2. Выборки сравнения

Первая выборка сравнения сформирована из радиоисточников обзора WENSS [21] с прямыми восхождениями в диапазоне $0^{\text{h}} \leq \text{RA} < 2^{\text{h}}$, которые ранее исследовались в микроволновом диапазоне [57]. Обзор WENSS (The Westerbork Northern Sky Survey) [21] выполнен на частоте 325 MHz и имеет предельный поток на уровне около 18 мЯн (порядка 5σ) с разрешением $54'' \times 54'' \text{ cosec}(\delta)$. Он покрывает Северную часть неба выше 29° по склонению. С использованием базы данных CATS [58] были проведены отождествление источников из первых двух часов по прямому восхождению, аппроксимация радиоспектров в процедуре `spg` [59] пакета FADPS [60, 61] 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 дале-

ких ($z > 0.3$) радиогалактик и описана в работах [22–24]. Этот список ранее уже использовался для исследования данных микроволнового фона, в частности, для поиска крупномасштабных течений вещества [62]. Радиоисточники выборки принадлежат популяции галактик самой высокой светимости (достигающей у отдельных объектов $10^{48} \text{ эрг с}^{-1}$, как, например, у PKS 0637-752 [63]), благодаря чему возможно 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 этой гипотезы говорят и радиояркость gE, 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 [64, 65]. 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 [22] 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 из базы данных CATS² [58]. Основные параметры входящих в каталог объектов — красное смещение $z > 0.3$ и морфологические свойства радиогалактики. Он, в основном, очищен от объектов с красными смещениями, определяемыми фотометрическим методом, и обладающих свойствами квазаров по имеющимся литературным данным. 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 ультракороткими спектрами ($\alpha < -1.0$). Именно среди таких объектов высок процент далеких радиогалактик [66–71], и с помощью этого критерия были открыты самые далекие, с красным смещением $z = 5.199$ [72] и $z = 4.514$ [73, 74]. 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 $z \geq 2.5$.

В выборку гигантских эллиптических галактик из 45 скоплений списка [25] мы включили 25 галактик типа gE (и cD), являющихся центральными галактиками скоплений, для которых имеются данные в оптическом и близком инфракрасном диапазонах. Ранее эта выборка уже использовалась при исследовании радиогалактик как дополнительная [75]. 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 [26] и BeppoSAX [27], отклик СМВ и результаты стэкинга для которых исследовались в работах [76, 77]. 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 менее 20% случаев для гауссовых шумов, в распределении среднего сигнала микроволнового фона в направлении на гамма-всплески. При этом короткие ($t < 2$ с) всплески на осредненной площадке попадают в локальный минимум фона, а длинные ($t > 2$ с) — 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 [10]. 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. с 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 ранее методике разделения выборок GRB на короткие и длинные события [76, 77], в данной работе мы разделили выборки списков BATSE и BeppoSAX таким же образом.

3. СРЕДНИЙ ПОПУЛЯЦИОННЫЙ МИКРОВОЛНОВОЙ СИГНАЛ

При анализе среднего сигнала популяции объектов каждой из подвыборок использовались многочастотные карты архива космической миссии Planck [1], а также карта СМВ SMICA, построенная методом разделения компонент многочастотного сигнала [78]. Из архивных карт Planck с помощью процедуры `mapcut` пакета GLESP³ [79] 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 [80]. Осреднение полей проводилось с помощью процедуры `difmap` пакета GLESP [79, 85, 86]. В процедуре стэкинга применялось осреднение выбранных площадок неба одинакового углового размера по пикселям

²<http://cats.sao.ru>

³<http://www.glesp.nbi.dk>

Таблица 2. Параметры выборок, используемых в исследовании

Каталог	Параметры селекции	Объем выборки	Средний сигнал СМВ, К	Разброс, К
GRG mixed	$\theta > 4'$	89	$-9.71e-06$	$6.5e-06$
cluster list	gE, cD-RG, $0.1 < z < 1.3$	25	$-2.74e-05$	$8.5e-06$
WENSS, RA $< 2^h$	$\alpha < -1.1$	224	$4.36e-05$	$5.2e-06$
WENSS, RA $< 2^h$	$-1.1 \leq \alpha < -0.75$	661	$3.54e-05$	$2.7e-06$
WENSS, RA $< 2^h$	$-0.75 \leq \alpha < -0.5$	497	$3.85e-05$	$3.0e-06$
WENSS, RA $< 2^h$	$-0.5 \leq \alpha < 0$	238	$3.57e-05$	$4.0e-06$
WENSS, RA $< 2^h$	$\alpha \geq 0$	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	$t < 2$ s	495	$2.60e-06$	$2.3e-06$
BATSE	$t \geq 2$ s	1540	shifted min	$1.9e-06$
BeppoSAX	$t < 2$ s	87	$-1.24e-05$	$4.9e-06$
BeppoSAX	$t \geq 2$ s	694	shifted max	$3.4e-06$

вдоль каждой колонки. Выбранные области анализировались пакетом SExtractor [81], что включало определение интегральной яркости центральных объектов и дисперсии сигнала.

Изучение и сравнение подвыборок объектов разных популяций проведено по двум направлениям: исследования среднего сигнала по данным карты СМВ Planck и среднего спектра по данным измерения термодинамической температуры на различных частотах. Параметры выборок, используемых в исследовании, приведены в таблице 2, где также указан средний уровень детектируемого сигнала в окрестности радиусом $7'$ и его отклонения в области стэкинга. Изображения осредненных областей вокруг объектов разных популяций, рассчитанных по данным карты СМВ SMICA, показаны на рис. 1. Средний сигнал СМВ в области ГРГ демонстрирует сложную топологию, включающую локальный максимум на уровне шумов в области более глубокого (детектируемого) минимума (таблица 2). Отметим, что шумовой сигнал на изображениях — это средний космологический шум, построенный по данным флуктуаций СМВ.

На эти флуктуации накладывается дополнительный сигнал вторичной анизотропии, связанный с присутствием радиоисточников 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. 2, 3, 4 и 5 приведены спектры средних объектов 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. 2). Спектр средней ГРГ плоский, в то время как у средних источников обзора WENSS он растет с частотой в рассматрива-

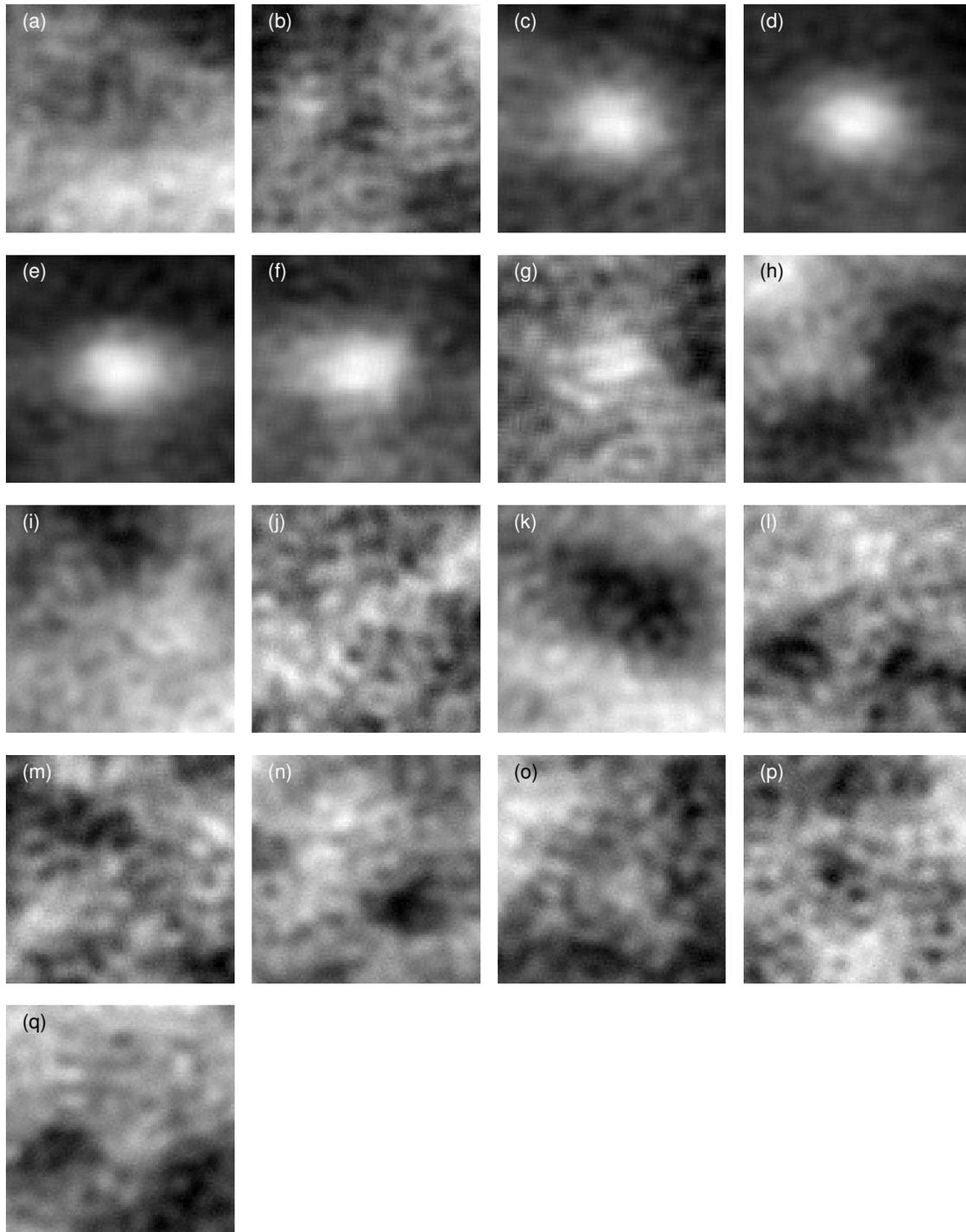


Рис. 1. Зоны стэкинга размером $1^\circ \times 1^\circ$, построенные по данным карты CMB SMICA Planck2.02. Слева направо сверху вниз изображения средних карт для популяций объектов (в скобках указано число объектов выборки): (a) ГРГ с угловыми размерами $\theta > 4'$ и линейными > 1 Мpc (89), (b) галактики типов gE и CD (25), (c) радиоисточники (RS) обзора WENSS со спектральными индексами $\alpha < -1.1$ (224), (d) WENSS RS с $-1.1 \leq \alpha < -0.75$ (661), (e) WENSS RS с $-0.75 \leq \alpha < -0.5$ (497), (f) WENSS RS с $-0.5 \leq \alpha < 0$ (238), (g) WENSS RS с $\alpha \geq 0$ (19), (h) далекие RG с красными смещениями $0.3 \leq z < 0.7$ (1797), (i) HZRG с $0.7 \leq z < 1.0$ (205), (j) HZRG с $1.0 \leq z < 1.5$ (149), (k) HZRG с $1.5 \leq z < 2.0$ (103), (l) HZRG с $2.0 \leq z < 2.5$ (77), (m) HZRG с $z \geq 2.5$ (81), (n) события BATSE длительностью $t < 2$ s (495), (o) BATSE, $t > 2$ s (1540), (p) ВерроSAX, $t < 2$ s (87), (q) ВерроSAX, $t > 2$ s (694). Исходные данные CMB приведены в шкале термодинамических температур.

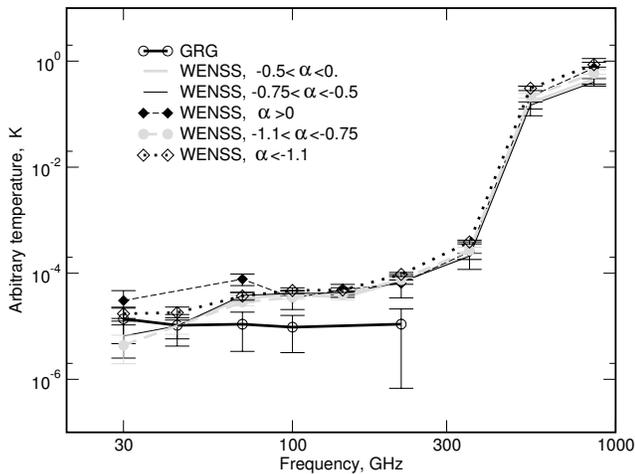


Рис. 2. Распределение энергии в спектре, представленной в термодинамической температуре $T_{\text{СМВ}}$, К, для $\nu < 500$ ГГц и Jy sr^{-1} для $\nu > 500$ ГГц, по данным осреднения областей вокруг радиисточников каталога WENSS из диапазона прямых восхождений $0^{\text{h}} \leq \text{RA} < 2^{\text{h}}$ на многочастотных картах наблюдений Planck. Здесь и на последующих рисунках шкала по оси абсцисс линейная.

емом диапазоне. Такое поведение популяционных радиисточников уже было отмечено ранее в работах [7–9] и связывалось с излучением пыли в родительских галактиках. Заметим, что сильный подъем участка спектра на высоких частотах $\nu > 500$ ГГц (рис. 2) не имеет физической природы, а вызван переходом от термодинамической температуры $T_{\text{СМВ}}$ на более низких частотах в другие единицы (а именно, Jy sr^{-1}). В данном случае более важна не условность спектра, а его форма (топология), отражающая реальный рост плотности потока с увеличением частоты, что показано в работах [8, 9]. Отсутствие высокочастотного сигнала для средней ГРГ говорит в пользу меньшей запыленности родительской галактики и о возможной связи размера радиисточника 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 СМВ. Этот факт связан с двумя проявившимися эффектами: большим числом осредняемых объектов (и увеличением отношения S/N) и присутствием множества сильных радиисточников в каждой подвыборке WENSS. Вторым эффектом эти подвыборки отличаются от свойств списков далеких радиогалактики, где сильных радиисточников мало. Не экранированные масками сильные источники WENSS прошли через процедуру разделения компонент при восстановлении карты СМВ, и их остаточное излучение наблюдается на этой карте.

Существенное отличие между популяциями в

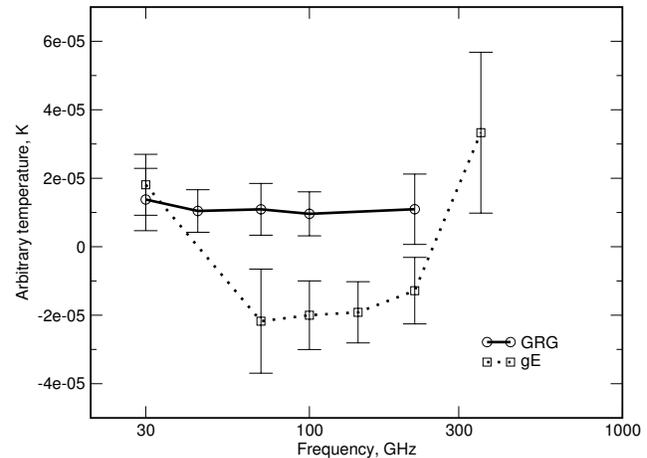


Рис. 3. Распределение энергии в спектре, представленной в термодинамической температуре, по данным осреднения областей вокруг гигантских эллиптических галактик типов gE и cD.

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 [10]. 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 [82] в предположении действия обратного комптоновского эффекта при рассеянии СМВ на электронах плазмы ГРГ, не наблюдается. Однако в области ГРГ на осредненном снимке СМВ имеется зона с понижением яркости со слабым источником в центре (рис. 1а). Это могло бы говорить о том, что СЗ-сигнал подавляется собственным излучением ГРГ, но при этом ожидаемый положительный пик в субмиллиметровом диапазоне все же не виден. Таким образом, вопрос о возможности 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. 4) для положительного отклика и отсутствию роста спектра на субмиллиметровом участке (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-минутной 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

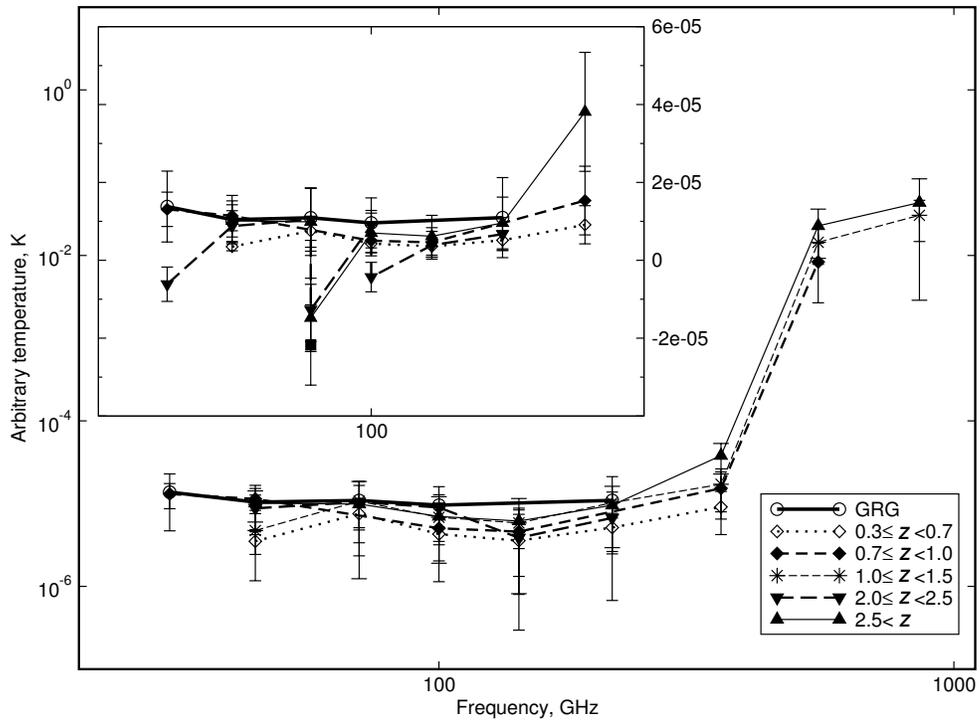


Рис. 4. Распределение энергии в спектре, представленной в термодинамической температуре $T_{\text{СМВ}}$, К, для $\nu < 500$ ГГц и Jy sr^{-1} для $\nu > 500$ ГГц, по данным осреднения областей вокруг далеких радиогалактик на многочастотных картах наблюдений Planck с удалением отрицательного среднего сигнала и включением данных по высоким частотам (545 ГГц и 857 ГГц). На врезке представлено это же распределение энергии, но с учетом отрицательного среднего сигнала и исключением высоких частот.

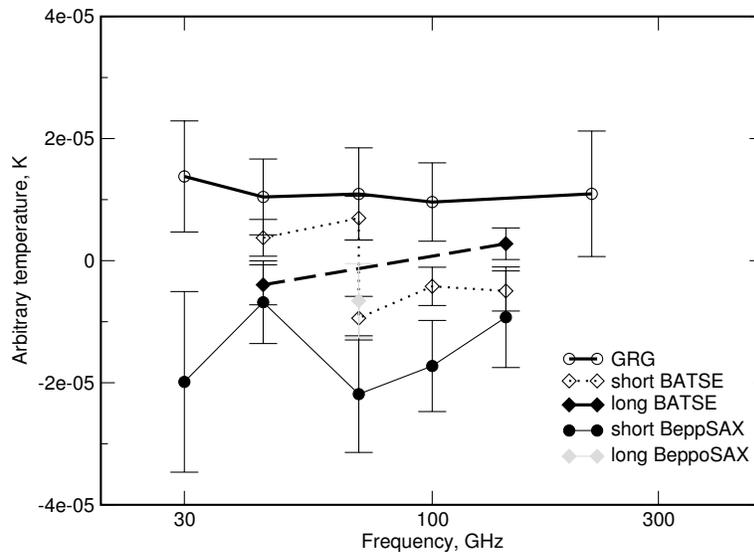


Рис. 5. Распределение энергии в спектре, представленной в термодинамической температуре $T_{\text{СМВ}}$, К, по данным осреднения областей вокруг гамма-всплесков каталогов BATSE и BeppoSAX на многочастотных картах наблюдений Planck.

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. 1) для первого случая обнаруживается минимум, а во втором случае — слабый локальный максимум на фоне спадающего сигнала СМВ. И для той, и для другой популя-

ций HZRG можно говорить о возможном влиянии СЗ-эффекта. Отметим, что в эпохи $1.5 \leq z < 2$ и $2 \leq z < 2.5$ происходит формирование скопленных галактик, включающее активный мерджинг, и нельзя исключить, что здесь может наблюдаться эффект Сакса–Вольфа [83], обусловленный влиянием переменного гравитационного потенциала на частоту фотона СМВ, пролетающего через формирующееся скопление.

Сравнение спектра ГРГ с данными по гамма-всплескам 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 [77].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено 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 — 89 гигантских радиогалактик с угловыми размерами больше $4'$, линейные размеры которых (менее 1 Мпк) подтверждены в литературе; они впервые представлены в данной работе единым списком. Для сравнения свойств ГРГ со свойствами других популяций изучались подвыборки объектов разных классов с селекцией по спектральным индексам, красным смещениям, оптической морфологии (галактики типов gE и cD), а также гамма-всплески из каталогов BATSE и ВерроSAX.

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

- 1) есть положительный сигнал в миллиметровом диапазоне, обсуждаемый в [37, 38, 84];
- 2) спектр в миллиметровом диапазоне — плоский;
- 3) сигнал в субмиллиметровом диапазоне отсутствует;
- 4) топологические свойства на средней карте флуктуаций СМВ имеют особенности: слабый незначимый максимум ($< 1\sigma$) находится в зоне минимума;
- 5) значимый СЗ-эффект, связанный с рассеянием фотонов СМВ на электронах плазмы джетов ГРГ [82] не наблюдается.

Сравнение с другими популяциями объектов показало, что к наиболее близким к ГРГ по средним микроволновым свойствам можно отнести далекие

радиогалактики из диапазонов красных смещений $0.3 \leq z < 0.7$ и $2 \leq z < 2.5$.

Также можно отметить, что, несмотря на схожесть (возможное пересечение) популяций источников, содержащих выборки объектов, объединенных по разным параметрам — радиоисточники WENSS с разными спектральными индексами и далекие радиогалактики, — особенности формы спектров у них различны. Спектр среднего объекта, построенный для популяций источников обзора WENSS, в микроволновом диапазоне растет с ростом частоты (рис. 2), но отличается от обнаруженного ранее поведения термодинамической температуры для RCR-источников [7–9], 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. 2), такой максимум наблюдается практически для всех диапазонов z . Существование локального максимума на 70 ГГц в принципе может быть объяснено сложением излучения, производимого различными механизмами в разных диапазонах частот: плоского синхротронного — в низкочастотной части спектра и пылевой компоненты родительской галактики — в высокочастотной области. Для выяснения причин появления локального максимума требуется дополнительное исследование индивидуальных источников. Можно упомянуть еще один момент, касающийся свойств среднего сигнала СМВ в направлении на далекие радиогалактики (рис. 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.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны рецензентам за полезные замечания при прочтении рукописи. Авторы также выражают свою признательность ESA за открытый доступ к результатам наблюдений и обработки данных в Planck Legacy Archive. В работе использован пакет GLESP для анализа протяженного излучения на сфере. Исследования по данной теме поддержаны грантом РФФИ № 13-02-00027.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R. Adam, et al. (Planck Collab.), *Astron. and Astrophys.*, 2015 (in press).
2. P. A. R. Ade, et al. (Planck Collab.), *Astron. and Astrophys.* **571**, A12 (2014).
3. Yu. N. Parijskij, N. S. Soboleva, O. V. Verkhodanov, et al., *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **40**, 125 (1996).
4. B. R. Granett, M. C. Neyrinck, and I. Szapudi, *Astrophys. J.* **683**, L99 (2008).

5. S. Ilić, M. Langer, and M. Douspis, *Astron. and Astrophys.* **556**, A51 (2013).
6. P. A. R. Ade, et al. (Planck Collab.), *Astron. and Astrophys.* **571**, A19 (2014).
7. O. V. Verkhodanov, E. K. Majorova, O. P. Zhelenkova, et al., *Astrophysical Bulletin* **70**, 156 (2015).
8. O. V. Verkhodanov, E. K. Majorova, O. P. Zhelenkova, et al. *Astronomy Letters* **41**, 457 (2015).
9. O. V. Verkhodanov, E. K. Majorova, O. P. Zhelenkova, et al. *Astronomy Reports* **60**, 2016 (in press).
10. Ya. B. Zeldovich and R. A. Sunyaev, *Astrophys. and Space Sci.* **4**, 301 (1969).
11. B. P. Venemans, H. J. A. Röttgering, G. K. Miley, et al., *Astron. and Astrophys.* **461**, 823 (2007).
12. R. J. McLure, M. J. Kukula, J. S. Dunlop, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **308**, 377 (1999).
13. S. Rawlings and M. J. Jarvis, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **355**, L9 (2004).
14. C. J. Willot, R. J. McLure, and M. J. Jarvis, *Astrophys. J.* **587**, L1 (2003).
15. M. L. Khabibullina and O. V. Verkhodanov, *Astronomy Reports* **55**, 302 (2011).
16. C. Tadhunter, D. Dicken, R. Morganti, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **445**, L51 (2014).
17. P. A. R. Ade, et al. (Planck Collab.), *Astron. and Astrophys.*, 2015 (in press).
18. E. Berger, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **52**, 43 (2014).
19. M. H. P. M. van Putten, G. M. Lee, M. Della Valle, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **444**, L58 (2014).
20. B. V. Komberg, D. I. Nagirner, and I. V. Zhuravleva, *Astronomy Reports* **52**, 707 (2008).
21. R. B. Rengelink, Y. Tang Y, A. G. de Bruyn, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **124**, 259 (1997).
22. M. L. Khabibullina and O. V. Verkhodanov, *Astrophysical Bulletin* **64**, 123 (2009).
23. M. L. Khabibullina and O. V. Verkhodanov, *Astrophysical Bulletin* **64**, 276 (2009).
24. M. L. Khabibullina and O. V. Verkhodanov, *Astrophysical Bulletin* **64**, 340 (2009).
25. S. A. Stanford, P. R. Eisenhardt, M. Dickinson, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **142**, 153 (2002).
26. W. S. Paciesas, C. A. Meegan, G. N. Pendleton, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **122**, 465 (1999).
27. D. Riccia, F. Fioreb, and P. Giommia, *Nuclear Phys. B* **69**, 618 (1999).
28. J. Machalski, M. Jamrozy, S. Zola, and D. Koziel, *Astron. and Astrophys.* **454**, 85 (2006).
29. V. R. Amirkhanyan, V. L. Afanasiev, and A. V. Moiseev, *Astrophysical Bulletin* **70**, 45 (2015).
30. J. M. Malarecki, L. Staveley-Smith, L. Saripalli, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **432**, 200 (2013).
31. J. M. Malarecki, D. H. Jones, L. Saripalli, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **449**, 955 (2015).
32. L. Saripalli, R. W. Hunstead, R. Subrahmanyan, and E. Boyce, *Astron. J.* **130**, 896 (2005).
33. D. I. Solovoyov and O. V. Verkhodanov, *Astrophysical Bulletin* **66**, 416 (2011).
34. A. P. Shoenmakers, A. G. de Bruyn, H. J. A. Röttgering, and H. van der Laan, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **146**, 293 (2000).
35. A. P. Shoenmakers, K.-H. Mack, A. G. de Bruyn, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **146**, 293 (2000).
36. J. Machalski, K. T. Chyzy, and M. Jamrozy, *Acta Astronomica* **54**, 249 (2004).
37. M. L. Khabibullina, O. V. Verkhodanov, M. Singh, et al., *Astronomy Reports* **54**, 571 (2010).
38. M. L. Khabibullina, O. V. Verkhodanov, and M. Singh, *Astrophysical Bulletin* **66**, 171 (2011).
39. R. G. Hine, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **189**, 527 (1979).
40. I. J. Danziger, W. M. Goss, and R. H. Frater, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **184**, 341 (1978).
41. A. P. Shoenmakers, K.-H. Mack, L. Lara, et al., *Astron. and Astrophys.* **336**, 455 (1998).
42. P. A. Jones, *Proc. Astron. Soc. Australia* **8**, 81 (1989).
43. L. Saripalli, R. Subrahmanyan, and R. W. Hunstead, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **269**, 37 (1994).
44. L. Saripalli, K.-H. Mack, U. Klein, et al., *Astron. and Astrophys.* **306**, 708 (1996).
45. L. Saripalli, Gopal-Krishna, W. Reich, and H. Kuhr, *Astron. and Astrophys.* **170**, 20 (1986).
46. M. Jamrozy, J. Kerp, U. Klein, et al., *Baltic Astronomy* **14**, 399 (2005).
47. C. Simpson, M. J. Ward, and A. S. Wilson, *Astrophys. J.* **454**, 683 (1995).
48. K. Chyzy, M. Jamrozy, S. J. Kleinman, et al., *Baltic Astronomy* **14**, 358 (2005).
49. P. Parma, H. R. de Ruiter, K.-H. Mack, et al., *Astron. and Astrophys.* **311**, 49 (1996).
50. J. Machalski, D. Koziel-Wierzbowska, M. Jamrozy, and D. J. Saikia, *Astrophys. J.* **679**, 149 (2008).
51. M. Molina, T. Venturi, A. Malizia, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **451**, 2370 (2015).
52. H. J. A. Röttgering, Y. Tang, M. A. R. Bremer, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **282**, 1033 (1996).
53. M. Molina, L. Bassani, A. Malizia, et al., *Astron. and Astrophys.* **565**, 2 (2014).
54. L. Lara, I. Marquez, W. D. Cotton, et al., *Astron. and Astrophys.* **348**, 699 (1999).
55. D. I. Solovoyov and O. V. Verkhodanov, *Astrophysical Bulletin* **69**, 141 (2014).
56. D. I. Solovoyov and O. V. Verkhodanov, *Astronomy Reports* **58**, 506 (2014).
57. O. V. Verkhodanov and O. S. Ulakhovich, in *Program and Abstracts 32 Russian Conf. on Modern Problems of Extragalactic Astronomy, Puschino, 2015* (PRAO, ASC FIAN, Puschino, 2015), p.17.
58. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach and V. N. Chernenkov, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **58**, 118 (2005).
59. O. V. Verkhodanov, в *Сб. тр. конф. по проблемам современной радиоастрономии, С.-Петербург, 1997* (ИПА РАН, С.-Петербург, 1997), т.1, с. 322.
60. O. V. Verkhodanov, in *Astronomical Data Analysis Software and Systems VI*, Ed. by G. Hunt and H. E. Payne, *ASP Conf. Ser.*, **125**, 46 (1997).

61. O. V. Verkhodanov, B. L. Erukhimov, M. L. Monosov, et al., *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **36**, 132 (1993).
62. O. V. Verkhodanov and M. L. Khabibullina, *Astrophysical Bulletin* **66**, 183 (2011).
63. F. Tavecchio, L. Maraschi R. M. Sambruna, and C. M. Urry, *Astrophys. J.* **544**, L23 (2000).
64. C. J. Willott, S. Rawlings, M. J. Jarvis, and K. M. Blundell, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **339**, 173 (2003).
65. B. Rocca-Volmerange, D. Le Borgne, C. De Breuck, et al., *Astron. and Astrophys.* **419**, 71 (2004).
66. G. Blumenthal and G. Miley, *Astron. and Astrophys.* **80**, 13 (1979).
67. R. D. Dagkesamanskii, *Nature* **226**, 432 (1970).
68. Yu. N. Parijskij, W. M. Goss, A. I. Kopylov, et al., *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **40**, 5 (1996).
69. Yu. N. Parijskij, W. M. Goss, A. I. Kopylov, et al., *Astron. Astrophys. Trans.* **18**, 437 (1999).
70. C. de Breuck, W. van Breugel, H. J. A. Röttgering, and G. Miley, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **143**, 303 (2000).
71. G. Miley and C. De Breuck, *Astron. Astrophys. Rev.* **15**, 67 (2008).
72. W. van Breugel, C. De Breuck, S. A. Stanford, et al., *Astrophys. J.* **518**, 61 (1999).
73. A. I. Kopylov, W. M. Goss, Yu. N. Pariiskii, et al., *Astronomy Letters* **32**, 433 (2006).
74. Yu. N. Parijskij, P. Thomasson, A. I. Kopylov, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **439**, 2314 (2014).
75. O. V. Verkhodanov, Yu. N. Parijskij, and A. A. Starobinsky, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **58**, 5 (2005).
76. O. V. Verkhodanov, V. V. Sokolov, M. L. Khabibullina, and S. V. Karpov, *Astrophysical Bulletin* **65**, 238 (2010).
77. M. L. Khabibullina, O. V. Verkhodanov, and V. V. Sokolov, *Astrophysical Bulletin* **69**, 472 (2014).
78. R. Adam, et al., (Planck Collab.), *Astron. and Astrophys.*, 2015 (in press).
79. O. V. Verkhodanov, A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, et al., *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **58**, 40 (2005).
80. R. J. Hanisch, A. Farris, E. W. Greisen, et al., *Astron. and Astrophys.* **376**, 359 (2001).
81. E. Bertin and S. Arnouts, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **117**, 393 (1996).
82. S. Colafrancesco and P. Marchegiani, *Astron. and Astrophys.* **535**, A108 (2011).
83. R. K. Sachs and A. M. Wolfe, *Astrophys. J.* **147**, 73 (1967).
84. O. V. Verkhodanov, M. L. Khabibullina, M. Singh, et al., in *Proc. Intern. Conf. on Problems of Practical Cosmology, St.-Petersburg, 2008*, Ed. by Yu. V. Baryshev, I. N. Taganov, and P. Teerikorpi (St.-Petersburg, 2008), p.247.
85. A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov, et al., *Intern. J. Mod. Phys. D* **14**, 275 (2005).
86. A. G. Doroshkevich, O. V. Verkhodanov, P. D. Naselsky, et al., *Intern. J. Mod. Phys. D* **20**, 1053 (2011).

A Comparison of Properties of Different Population Radio Galaxies Based on the Planck Mission Microwave Data

O. V. Verkhodanov, D. I. Solovyov, O. S. Ulakhovich, and M. L. Khabibullina

Applying the stacking method, we examine the areas of the cosmic microwave background radiation (CMB) maps, constructed according to the Planck Space Observatory data in the neighborhood of different populations of radio sources and giant elliptical galaxies. The samples of objects include giant radio galaxies (GRG), radio sources, selected by the radio-spectral index and redshift, as well as the gamma-ray bursts, used as a secondary comparative sample. We have studied the topological properties of the CMB signal in the neighborhood of the average object of the population, namely, we searched for the presence of the maxima and minima in the average area. The difference of the signal in the neighborhood of GRGs from the other types of objects was discovered.

Keywords: *galaxies: spiral—galaxies*