

УДК 524.7-77

РАДИОИСТОЧНИКИ СЛУЧАЙНОЙ ОБЛАСТИ НЕБА

© 2019 А. А. Запорожец¹, О. В. Верходанов^{2*}¹Астрофизическая школа «Траектория», Москва, 109147 Россия²Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 18 марта 2019 года; после доработки 26 июня 2019 года; принята к публикации 26 июня 2019 года

В работе выполнен статистический анализ данных радиоастрономических обзоров в области неба размером около 177° на высоких галактических широтах. Область была разделена на четыре одинаковых по площади сектора, и в каждом из них проанализированы наблюдаемые свойства радиоисточников и космического микроволнового фона. Показано, что распределение физических параметров (плотность потока, тип радиоспектра, спектральный индекс радиисточников), а также свойства фонового излучения в области размером 177° соответствуют космологическому принципу, в то время как количество радиоисточников и их морфологический тип существенно отличаются на различных площадках. Это говорит о том, что проведение исследований на участках неба данного размера при анализе СМВ может дать статистически верную картину на высоких мультиполях (соответствующих размеру области), в то время как обобщение на все небо подсчетов объектов и их эволюционных морфологических характеристик на полную популяцию источников неочевидно. Обнаружен сдвиг в распределении отклика в направлении на радиоисточники на карте реликтового излучения в положительную сторону на уровне 2σ , повторяющийся во всех четырех секторах. По данным анализа многочастотных карт Planck подготовлен каталог, содержащий 120 новых кандидатов в скопления галактик с эффектом Сюняева–Зельдовича, 46 из которых могут быть далекими ($z > 0.7$).

Ключевые слова: *источники радиоизлучения: обзоры*

1. ВВЕДЕНИЕ

Предоставление цифрового доступа к многочастотным изображениям и каталогам обзоров всего неба открывает множество возможностей для астрофизических и космологических исследований. Одна из них, помимо изучения отдельных объектов в разных частотных диапазонах, — проведение статистического анализа популяций источников. При этом исследование эволюционных свойств радиоисточников по данным цифровых обзоров представляет интерес и для анализа процессов в самих радиогалактиках и их окружении, и для изучения эволюции Вселенной в целом.

Выбор условной случайной площадки при рассмотрении различных популяций радиоисточников, конечно, не может решить задачу массового изучения интересных объектов, в отличие от работы с выборками на полном небе, но зато позволяет выявить некоторые статистические особенности распределения подвыборок объектов по различным наблюдаемым параметрам. Если площадка на небе достаточно большая, то в силу космологического принципа можно обобщать результаты анализа и

в дальнейшем использовать оцененные характеристики выборки как сравнительные величины для популяций радиоисточников на других участках неба. Проверка космологического принципа стала особенно актуальной в последнее время [1], когда началось активное обсуждение нестыковок в измерениях различных наблюдательных экспериментов постоянной Хаббла и других космологических параметров [2, 3].

Отдельный интерес представляет изучение физических свойств объектов, объединяемых в общие популяции по тем или иным параметрам. В этом направлении кросс-идентификация разномасштабных обзоров стала одним из наиболее часто используемых методов поиска активных космических объектов, в основном, активных ядер галактик (AGN), и сравнения их физических свойств. Ранее уже проводились исследования кросс-идентификационных списков радиоисточников обзора FIRST [4], полученных на VLA, галактик оптического обзора SDSS [5] (см. работу [6]), источников рентгеновских обзоров [7] совместно с радиоисточниками [8] и низкочастотных радиоисточников [9] с инфракрасными объектами [10] (см. статью [11]).

Специализированные исследования оптических

*E-mail: vo@sao.ru

отождествлений радиисточников проводились разными группами авторов [12–15] для понимания физики радиогалактик [16], исследования окружения радиогалактик и их эволюции [17, 18] и изучения свойств Вселенной в целом [19, 20].

Идентификация радиисточников с данными миллиметровых и субмиллиметровых полных обзоров неба [21, 22] позволило выделять объекты—кандидаты в скопления галактик по тепловому эффекту Сюняева—Зельдовича [23]. А отождествление кандидатов в скопления с положением далеких радиогалактик на небе может упростить поиск далеких скоплений [24–26].

В настоящей работе мы провели исследование радиисточников в выбранной области неба размером примерно 177° , их классификацию и сопоставление с данными оптического и микроволновых обзоров неба. Разделив область на четыре одинаковых по площади сектора, мы также проверили космологический принцип.

2. ДАННЫЕ

Для «случайного» выбора площадки мы ограничились областью $11:08 < RA < 12:08$ по прямому восхождению и $37:30 < Dec < 52:30$ по склонению. Центр области имеет координаты $RA=11:38:00$, $Dec=45:00:00$ на эпоху 2000.0, а сама исследуемая зона заключена внутри круга радиусом $7^\circ 5'$. Эта зона находится в высоких галактических широтах $b > 35^\circ$ северного галактического полушария вдали от Северного Галактического Шпура. Выбор области определялся возможностью пересечения с основными обзорами неба, а также минимизацией вклада галактических фоновых компонент в микроволновом диапазоне длин волн. Кроме того, в этом направлении регистрируется низкий уровень корреляций распределения радиисточников и распределенного миллиметрового излучения на низких гармониках по данным обзоров NVSS [27] и космического микроволнового фона [28]. На рис. 1 показана область неба, выбранная для анализа в данной работе, которая наложена на карту реликтового излучения миссии Planck [3].

Базовая выборка радиисточников строилась на основе обзора NVSS [27] с использованием процедур базы данных CATS [29]. Обзор NVSS (NRAO VLA Sky Survey) [27] является самым полным обзором северного неба с высокой чувствительностью и большой площадью покрытия. Он был выполнен на Большой Антенной Решетке (Very Large Array, VLA) на частоте 1.4 ГГц с 1993 по 1996 гг. и покрыл все северное небо выше склонения $\delta = -40^\circ$ (33884° , или 82% небесной сферы). Обзор активно используется для

различных статистических исследований в области космологии. Каталог содержит 1.8×10^6 источников, и, согласно описанию, является полным на 99% до плотностей интегральных потоков более $S_{1.4} = 3.5$ мЯн и полным на 50% до плотностей потоков 2.5 мЯн. Обзор проводился в D-конфигурации радиотелескопа VLA, и размер синтезированной диаграммы направленности на уровне половинной мощности, определяющий разрешение, составил около $45''$. Данные обзора NVSS доступны на сайтах NRAO¹, виртуального телескопа SkyView² и в базе данных CATS³ [29, 30].

Радиисточники были классифицированы по морфологическому типу Fanaroff—Riely [31] на основе карт обзора FIRST [4] с использованием интерфейса виртуальной обсерватории SkyView. Обзор FIRST [4] также проводился на телескопе VLA на частоте 1.4 ГГц, но в B-конфигурации. Он покрывает северную и частично южную галактические полярные шапки и имеет разрешение порядка $5''$. Согласно работе [4], полнота обзора на уровне 2.5 мЯн составляет 95%, а на уровне 1 мЯн — 80%. Каталог содержит 771076 источников и покрывает 8565° (7954° на северном полюсе и 661° на южном), что составляет 21% небесной сферы.

Для радиоотождествления мы применяли процедуры и архив базы данных CATS. При расчете спектральных индексов использовались результаты кросс-идентификации в БД CATS с окном отождествления $120'' \times 120''$. Для удаления случайных радиообъектов поля в заданном боксе применялась методика анализа данных, подобная описанной в работах [32, 33]. Суть метода состоит в совместном анализе данных в координатном и спектральном пространствах для выделения вероятных отождествлений конкретных радиисточников на различных радиочастотах. Для этих целей используется программа `spg` [34] системы обработки континуальных данных на RATAN-600. При описании спектров $S(\nu)$ и дальнейшего вычисления спектральных индексов мы применили параметризацию $S(\nu)$ формулой $\lg S(\nu) = A + Bx + Cf(x)$, где S — плотность потока в Ян, x — логарифм частоты ν в МГц и $f(x)$ — одна из следующих функций $\exp(-x)$, $\exp(x)$ или x^2 . Среди основных радиокаталогов БД CATS, используемых при построении спектров, отметим списки из работ [4, 9, 27, 35–46].

¹<http://www.cv.nrao.edu/nvss/>

²<http://skyview.gsfc.nasa.gov>

³<http://cats.sao.ru>

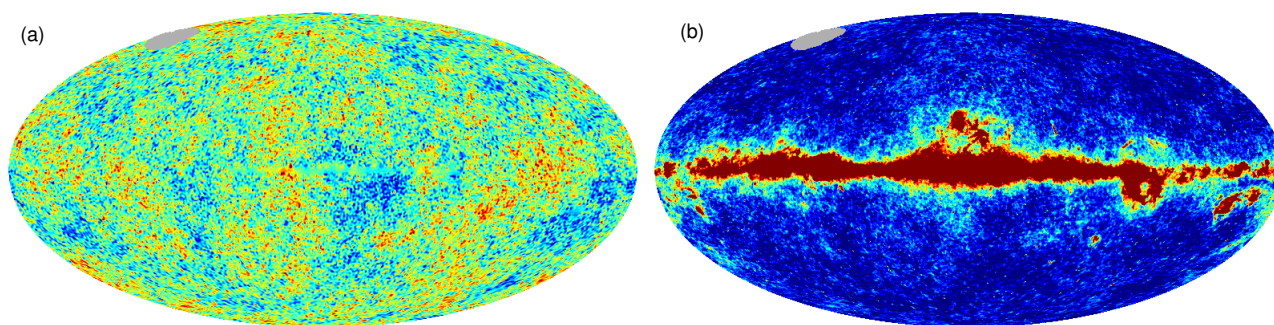


Рис. 1. Область неба (сверху слева на каждой карте), используемая для анализа, наложенная на карту реликтового излучения (а) и карту радиоизлучения на частоте 30 ГГц (б) миссии Planck. Карты построены в галактических координатах, где по экватору расположена плоскость Галактики.

Для анализа статистических свойств объектов в выбранной области неба мы использовали многочастотные карты и карту реликтового излучения космической миссии Planck релиза 2018 [3]. Наблюдения обсерватории Planck⁴ Европейского космического агентства (ESA) проводились с целью исследования космического микроволнового фона на полном небе [47]. Публикация данных микроволнового диапазона по протяженному излучению неба на полной сфере в эксперименте предоставила новые возможности для исследования компонент фонового излучения и радиоисточников в области миллиметровых и субмиллиметровых длин волн. Архив данных содержит результаты наблюдений на высокочастотном комплексе HFI (High Frequency Instrument) с полосами на 100, 143, 217, 353, 545, 857 ГГц и на низкочастотном LFI (Low Frequency Instrument) с полосами на 30, 44, 70 ГГц. Спутник обращался вокруг точки L2 в системе Земля–Солнце. Разрешение карты реликтового фона (Cosmic Microwave Background — CMB) составило около 5'. Архив миссии Planck (Planck Legacy Archive — PLA⁵), содержащий карты компонент излучения трех релизов, дает возможность исследовать микроволновой сигнал с различным разрешением, что представляет интерес при исследовании происхождения вторичной анизотропии температуры, дающей вклад в том числе и в распределение CMB. Коэффициенты гармонического разложения карт доступны на сайте CMB⁶ [48].

3. МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Мы разбили выбранную зону на четыре одинаковых по площади сектора (около 44.2° каждый), внутри которых провели радиоотождествления объектов и исследовали их статистические

свойства. Координаты площадок (границы областей) приведены в таблице 1.

Гистограммы распределения по спектральному индексу и плотности потока для объектов анализируемых выборок показаны соответственно на рис. 2 и 3. Различие в амплитудах гистограмм обусловлено различием числа источников в секторах (см. таблицу 1).

Для источников с радиоотождествлениями во всех четырех секторах мы подготовили средние континуальные спектры по методике, описанной в работе [49]. Осреднение континуальных радиоспектров проводилось двумя методами: 1) в плоскости плотности потоков и 2) в плоскости логарифма плотности потока. В первом случае строилась зависимость

$$S(\nu_j) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N f_k(\nu_j)/f_k(1400), \quad (1)$$

где ν_j — набор частот в аппроксимационном массиве данных для k -го источника, $f_k(\nu_j)$ — значение плотности потока, рассчитанного для аппроксимационной кривой k -го источника на частоте ν_j , N — количество радиоисточников, для которых есть аппроксимационный спектр. Перед процедурой осреднения все спектры приводились к одной величине на частоте 1400 МГц домножением на соответствующий коэффициент в пространстве плотности потока. Во втором случае применялось осреднение по формуле

$$\lg S(\nu_j) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \lg f_k(\nu_j) \quad (2)$$

с теми же обозначениями, что и в формуле (1). Процедура осреднения радиоспектров проводилась с помощью утилиты `spcalc` системы обработки данных FADPS [50] на ПАТАН-600. Построенные средние спектры для разных секторов показаны на рис. 4 и 5.

⁴https://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Planck

⁵<http://pla.esac.esa.int/pla/#home>

⁶<http://cmb.sao.ru>

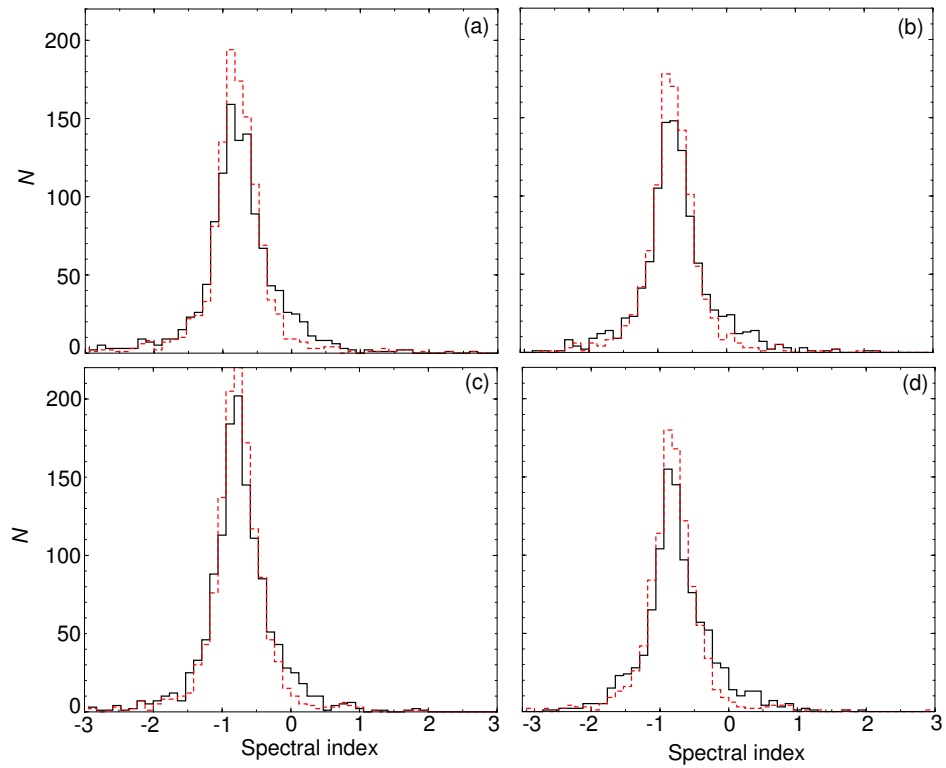


Рис. 2. Гистограммы распределения по спектральному индексу анализируемых источников на частотах 1400 МГц (сплошная линия) и 325 МГц (штриховая линия) в секторах 1–4 исследуемой области (см. таблицу 1).

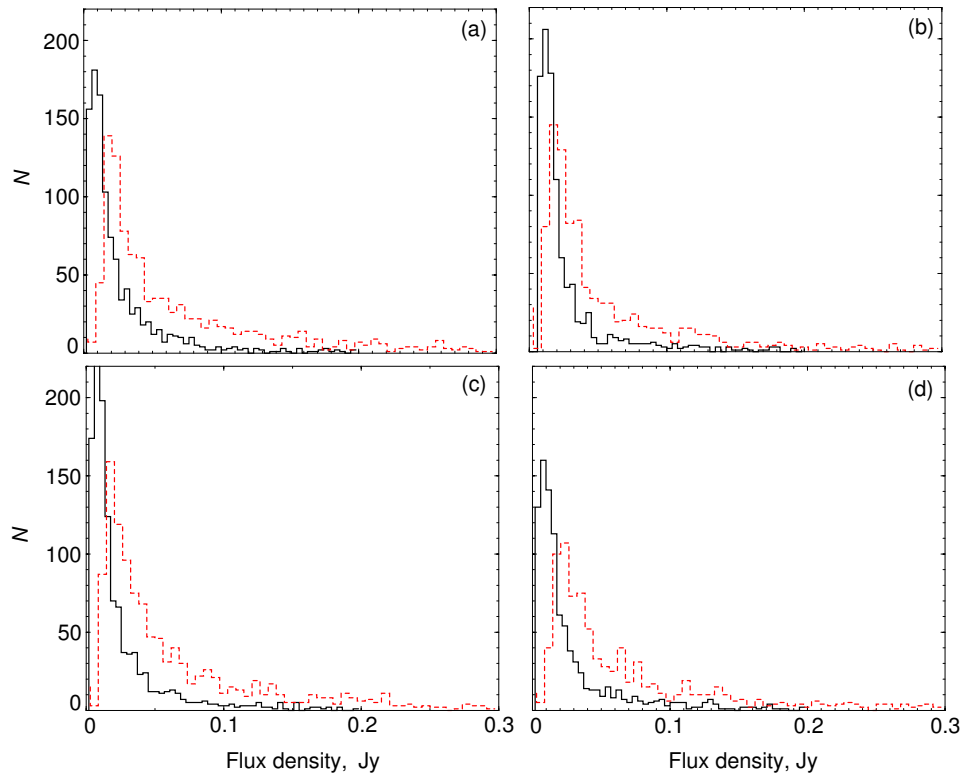


Рис. 3. То же, что на рис. 2, но по плотности потока.

Таблица 1. Статистические свойства радиоисточников в исследуемой зоне, разбитой на четыре сектора равной площади

Параметр	Сектор 1	Сектор 2	Сектор 3	Сектор 4
Границы сектора (RA, Dec)	$< 11 : 38, < 45^\circ$	$< 11 : 38, > 45^\circ$	$> 11 : 38, < 45^\circ$	$> 11 : 38, > 45^\circ$
N_{NVSS}^a	2387	2100	2372	2055
$N_{NVSS,sp}^b$	1168	1064	1305	1040
α_a^c	-0.76	-0.74	-0.75	-0.76
$\sigma_{\alpha_a}^d$	0.67	0.66	0.54	0.59
α_m^e	-0.78	-0.76	-0.76	-0.80
$N_{\alpha < -0.9}^f$	435	371	440	384
$N_{\alpha < -0.9}/N^g, \%$	18.2	17.6	18.5	18.7
$N_{FR I}^h$	195	196	217	161
$N_{FR II}^i$	38	29	27	24
$\Delta T_{CMB,a} \times 10^{-5} j, K$	4.73	2.80	3.05	2.12
$\sigma_{\Delta T_{CMB,a}} \times 10^{-5} k, K$	9.06	10.50	9.58	9.63
$\Delta T_{CMB,m} \times 10^{-5} l, K$	4.92	2.76	3.27	2.43
N_{ZS}^m	60	25	24	11
$N_{ZS,\alpha < -0.9}^n$	18	11	10	7

a — число объектов обзора NVSS в заданной области; b — число объектов с построенным спектром; c — средний спектральный индекс радиоисточников; d, e — его разброс и медиана; f — число источников с крутым радиоспектром ($\alpha < -0.9$); g — относительное число источников с $\alpha < -0.9$; h, i — число источников типа FR I и FR II с $\alpha < -0.9$; j, k, l — средняя вариации температуры CMB, ее разброс и медиана; m, n — количество радиоисточников с C3-эффектом и радиоисточников с $\alpha < -0.9$ и C3-эффектом.

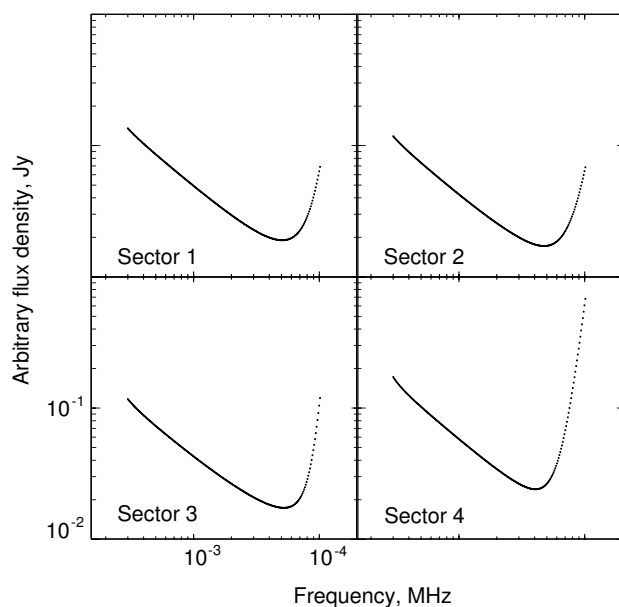
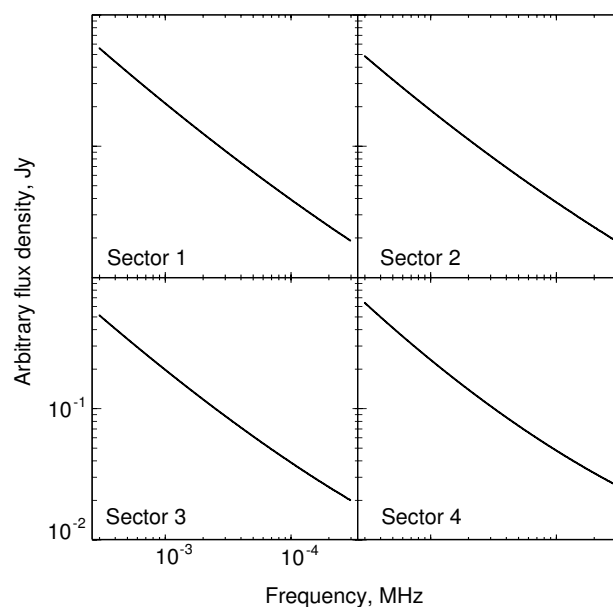
**Рис. 4.** Континуальные радиоспектры объектов из секторов 1–4 исследуемой зоны (см. таблицу 1), осредненные по плотности потока, согласно формуле (1).**Рис. 5.** То же, что на рис. 4, но с осреднением по логарифму плотности потока методом, описанным формулой (2).

Таблица 2. Статистические свойства фоновых объектов в четырех полях исследуемой области неба вокруг радиоисточников разных морфологических типов

Сектор	N_{type}	$r_{\text{min}}^{\text{FRI}}$	$r_{\text{med}}^{\text{FRI}}$	$r_{\text{max}}^{\text{FRI}}$	$r_{\text{min}}^{\text{FR II}}$	$r_{\text{med}}^{\text{FR II}}$	$r_{\text{max}}^{\text{FR II}}$
1	233	1.092	1.770	3.130	1.341	1.434	2.545
2	225	1.265	1.911	3.337	1.468	1.864	2.457
3	234	1.363	2.045	4.552	1.359	2.039	2.586
4	185	1.086	1.886	3.887	1.322	1.840	2.751

Средние радиоспектры выглядят чрезвычайно похожими для различных секторов, а небольшое отличие для спектров, построенных по формуле (2), в области миллиметрового диапазона (см. рис. 5), в принципе, может характеризовать особенности распределения энергии в радиоспектре, обусловленные различным числом и несхожими свойствами радиоисточников в заданной области неба.

Используя карты неоднородностей СМВ SMICA миссии Planck из архива третьего релиза данных [3], мы исследовали статистику отклика сигнала флуктуаций в направлении на радиоисточники во всех четырех секторах. Для сравнения с ожидаемым распределением для идеального сигнала СМВ были подготовлены 200 карт (в мультипольном разложении использовались гармоники с номерами в диапазоне $2 \leq \ell \leq 4048$), сгенерированных для случайных гауссовых полей на основе углового спектра мощности флуктуаций температуры СМВ в рамках космологической модели Λ CDM ($\Omega_{\Lambda} = 0.69$, $\Omega_m = 0.31$, $h = 0.68$). По данным моделирования сделаны оценки $\pm 1, 2, 3\sigma$ -уровней неоднородностей температуры, показанные на рис. 6. Статистические характеристики откликов на карте СМВ приведены в таблице 1.

В каждом из секторов мы исследовали объекты с ультракраткими спектрами, где $\alpha < -0.9$ ($S \sim \nu^{\alpha}$), а спектральный индекс α рассчитывался как тангенс угла наклона касательной к непрерывному спектру на частоте 1400 МГц. На основе этого списка можно в дальнейшем проводить отбор кандидатов в далекие радиогалактики и, возможно, скопления галактик. Количество объектов с $\alpha < -0.9$ приведено в таблице 1. С использованием обзора FIRST в рамках виртуальной обсерватории SkyView была проведена классификация радиоисточников по морфологическим типам I и II Fanaroff и Riley [31]. Мы использовали базу данных NED⁷ (NASA Extragalactic Database) для подсчета

фоновых оптических объектов (в основном, из оптического обзора SDSS [5]) и сравнения их числа в окрестностях разных радиоисточников. Объекты подсчитывались в площадках размером $5' \times 5'$, и их количество относилось к минимальному числу фоновых источников в исследуемой области. В таблице 2 приведены относительные подсчеты фоновых оптических объектов в окружении радиогалактик с $\alpha < -0.9$ и морфологических типов FR I и FR II. В столбцах приведены соответственно номер сектора, число радиоисточников с установленным типом протяженной структуры для радиоисточников с $\alpha < -0.9$, относительное число фоновых оптических объектов для заданного типа FR I: минимальное, медианное и максимальное, и аналогично для типа FR II. Для исследуемых кандидатов в далекие объекты в NED отсутствуют данные о красных смещениях, и подсчеты проводились в проекции на сферу.

Кроме того, мы применили алгоритм поиска объектов с эффектом Сюняева–Зельдовича, описанный ранее [24–26], и отобрали среди объектов с $\alpha < -0.9$ возможные кандидаты в далекие скопления галактик⁸. Для селекции источников мы использовали многочастотные карты Planck миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов. Число объектов — кандидатов с СЗ-эффектом — в каждом секторе исследуемой области неба приведено в таблице 1.

Сопоставление данных для списков радиоисточников из различных диапазонов длин волн позволило построить диаграммы, отражающие многочастотные статистические свойства объектов в исследуемой области неба. На рис. 7 приведена диаграмма «спектральный индекс радиоисточника α –отклик на карте флуктуаций СМВ» для данных измерений неоднородностей СМВ в направлении на радиоисточники. Рисунок 8 показывает диаграмму «спектральный индекс радиоисточника α –относительное число фоновых объектов» для тех радиоисточников с $\alpha < -0.9$, для которых наблюдается СЗ-эффект.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Исходя из предположения, что на больших угловых масштабах статистические свойства Вселенной, связанные с объектами и фоновыми излучениями, не должны отличаться в равных по площади областях неба в проекции на сферу, мы проверили космологический принцип для четырех площадок размером 44.2П° каждая. Полученные нами оценки (см. таблицу 1) позволяют заключить следующее:

⁷<http://nedwww.ipac.caltech.edu>

⁸Списки доступны по адресу http://sed.sao.ru/~vo/pub_tab/tab_ABUL2019N3_rand_field.html

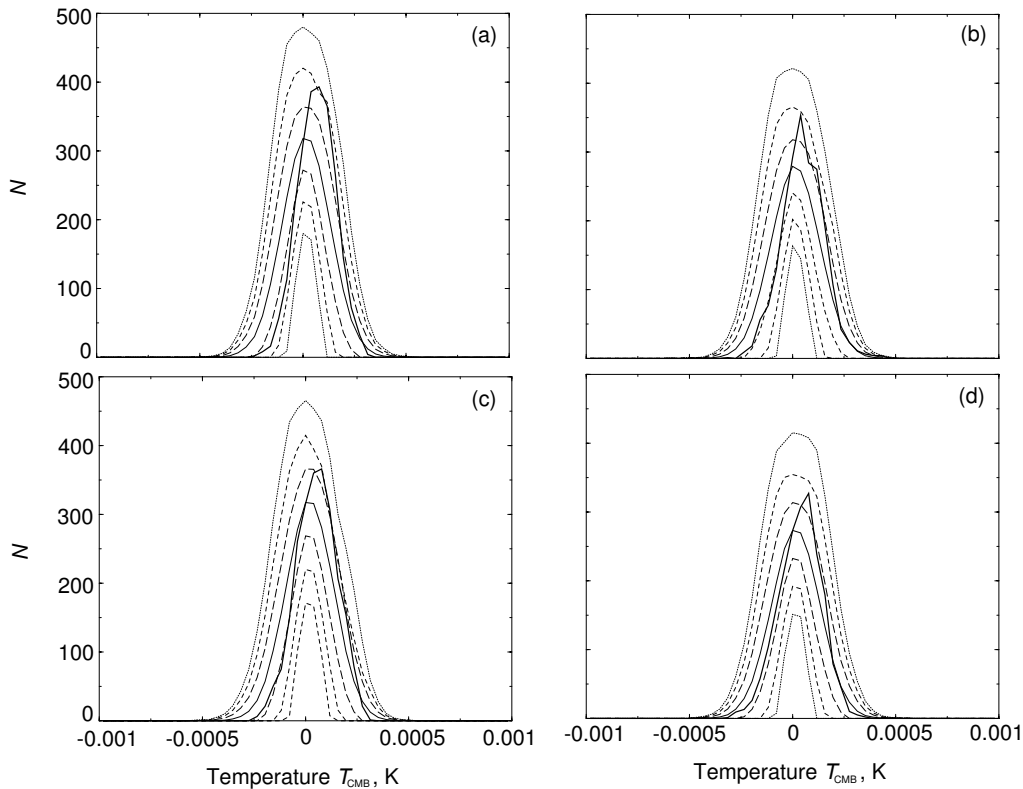


Рис. 6. Распределение отклика на карте CMB SMICA космической миссии Planck в направлении на радиоисточники (жирная сплошная линия) для секторов 1–4 исследуемой зоны (см. таблицу 1). Тонкой сплошной линией показано ожидаемое распределение на карте CMB в космологической модели Λ CDM по данным 200 моделирований CMB-карт. Штриховыми и пунктирными линиями соответственно отмечены уровни $\pm 1, 2, 3\sigma$ по данным тех же моделирований.

1. На рассматриваемых масштабах подсчеты источников дают значимое различие для разных зон неба равной площади, составляющее около 14% для общего числа объектов NVSS и примерно 20% для источников с радиоотождествлением, что мы отмечаем как существенное.

2. Распределение по спектральному индексу и плотности потока на частотах 1400 и 325 МГц для источников с радиоотождествлением на разных частотах в целом подобно для различных площадок, а средние и медианные спектральные индексы различаются несущественно и колеблются у значения $\alpha = -0.76$.

3. Средние континуальные радиоспектры, построенные осреднением как в пространстве плотностей потоков, так в пространстве логарифмов потоков, не имеют принципиальных отличий по форме на разных площадках неба.

4. Отклик сигнала на карте анизотропии космического микроволнового фона SMICA Planck в направлении на радиоисточники статистически одинаков для разных областей неба, а распределение отклика имеет сдвиг в положительную

сторону на уровне на уровне значимости 2σ во всех четырех рассматриваемых областях неба.

5. Диаграмма «спектральный индекс радиоисточника–отклик на карте CMB» (рис. 7) выглядит практически одинаково во всех исследуемых областях, что естественно, если учитывать подобие распределений этих параметров.

6. Визуальная морфологическая классификация протяженных структур по данным отбора FIRST [4] (с чувствительностью около 1 мЯн на уровне 5σ и разрешением $5''$) показывает преимущественное обнаружение объектов типа FR I по отношению к FR II; отношение количества объектов этих типов варьируется от 5 до 8 раз для разных площадок.

7. Число кандидатов в скопления галактик с эффектом Сюняева–Зельдовича по данным карт Planck для радиогалактик с ультракрутыми спектрами в разных областях различается всего в 1.5–2 раза, в то время как в зонах локализации радиоисточников — в несколько раз.

Отметим еще несколько моментов. Сдвиг распределения отклика на карте CMB для всех площадок, по-видимому, говорит о дополнительном сла-

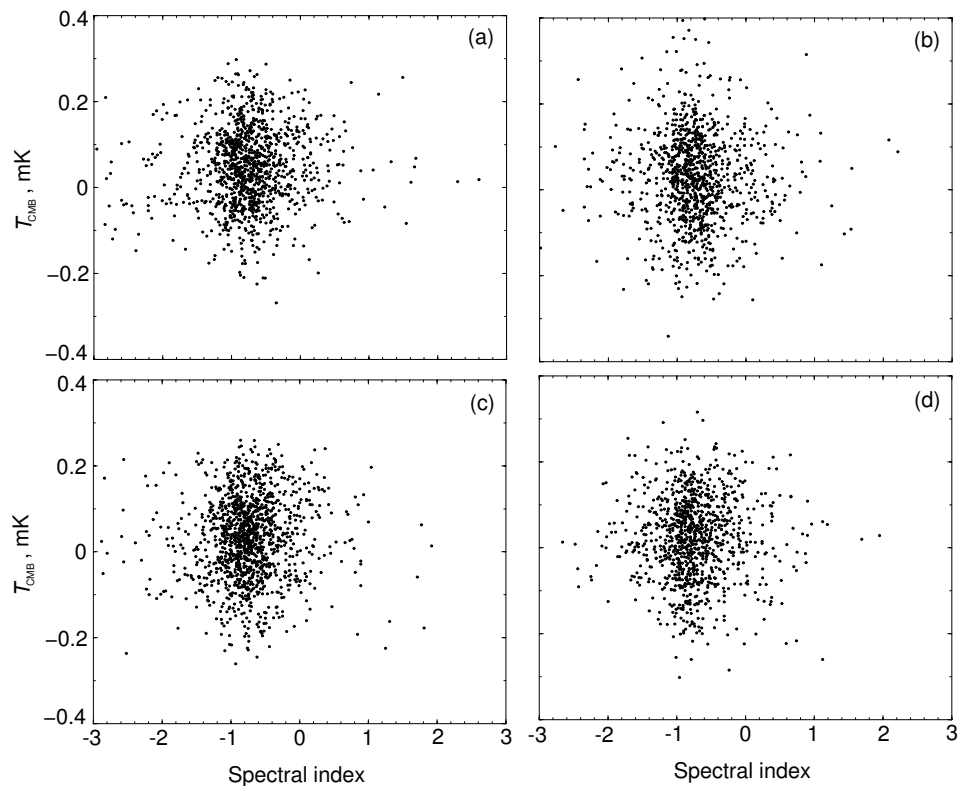


Рис. 7. Диаграмма «спектральный индекс радиоисточника—отклик на карте флуктуаций СМВ» для данных измерений неоднородностей СМВ в направлении на радиоисточники в секторах 1–4 исследуемой зоны (см. таблицу 1).

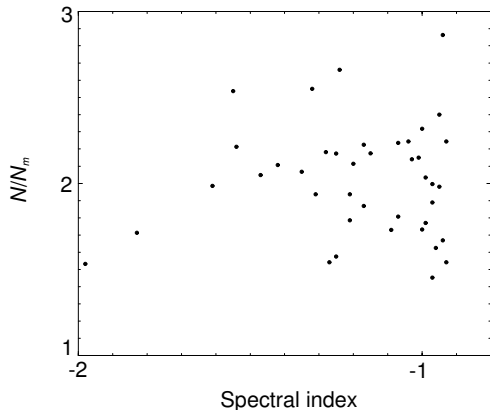


Рис. 8. Диаграмма «спектральный индекс радиоисточника—относительное число фоновых объектов» для тех радиоисточников со спектральным индексом $\alpha < -0.9$, для которых наблюдается СЗ-эффект.

бом источнике вторичной анизотропии микроволнового фона, который может быть обусловлен либо вкладом миллиметрового излучения родительских галактик радиоисточников, либо вкладом далеких фоновых галактик из окружения радиоисточников, о которых упоминалось среди результатов работы обсерватории Planck [51]. Любопытным моментом является то, что мы ожидали увидеть сдвиг сред-

него отклика на карте СМВ в направлении на радиоисточники, но в другую сторону — в отрицательную, как это обнаружилось для кандидатов в скопления галактик ранее [24, 26, 53]. Ожидаемое смещение в отрицательную сторону на карте СМВ в направлении на скопления галактик обусловлено процедурой разделения компонент фонового сигнала, когда остаточный сигнал от эффекта Сюняева—Зельдовича в миллиметровом диапазоне остается на очищенной карте СМВ, тем самым являясь маркером кандидата в скопление. Однако в данном случае средний сигнал, смещенный в положительную сторону, говорит, скорее всего, о присутствии радиоизлучения либо как остаточного от синхротронного радиокомпонента галактики, либо от пылевой компоненты родительской галактики. Этот фактор затрудняет упрощенный поиск далеких скоплений галактик по карте СМВ, но может объяснить малое число (почти на два порядка меньше ожидаемого) кандидатов в скопления галактик, обнаруженных с помощью СЗ-эффекта в каталоге Planck.

Различие в числе объектов разных морфологических типов может быть связано с двумя факторами селекции: 1) с недостаточным разрешением протяженного радиоисточника, которое создает для слабых объектов эффект концентрации излучения в центре, из-за чего радиогалактика типа

FR II может быть ошибочно отнесена к объектам FR I, либо 2) с тем, что мы наблюдаем чаще более близкие объекты, которые имеют статистически более «старые» структуры типа FR I. Второй факт может объяснить неравномерное распределение по числу объектов типа FR I в разных зонах и более равномерное — объектов типа FR II. Для первых объектов, как более близких, ощущается влияние в распределении в проекции на сферу неоднородностей крупномасштабной структуры, а для второго типа мы переходим к масштабам, большим, чем ячейка неоднородности. Подчеркнем, что для того, чтобы сделать окончательное заключение о причинах различия в числе объектов разных типов надо все-таки иметь данные о красных смещениях.

Любопытной является диаграмма (рис. 8), где для радиоисточников с ультракрутыми спектрами, которые подозреваются на наличие СЗ-эффекта по многочастотным данным Planck, приведены результаты относительного подсчета фоновых объектов. Средняя величина относительного числа фоновых объектов (а именно, числа объектов в 5'-окрестности радиоисточника по отношению к минимальному подсчитанному числу в исследуемой области) составляет порядка 2. Это значение является косвенным подтверждением увеличенной плотности материи в районе радиоисточников-кандидатов в далекие радиогалактики, причем (с учетом СЗ-эффекта) находящихся в далеких скоплениях галактик. Если говорить о морфологическом типе объектов, то практически все (кроме одного) визуально классифицированные радиоисточники на этой диаграмме относятся к типу FR I, что, в принципе, объяснимо эффектом селекции (см. выше). Всего в полной исследуемой зоне обнаружено 120 кандидатов в скопления галактик с эффектом Сюняева–Зельдовича. У 46 из них спектральный индекс $\alpha < -0.9$, что с учетом диаграммы «радиоспектральный индекс α –красное смещение z » [52, 54] делает их кандидатами в далекие скопления галактик ($z > 0.7$).

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено статистическое исследование области в высоких галактических широтах с координатами центра $RA = 11^h 38^m 00^s$ и $Dec = 45^\circ 00' 00''$, на эпоху 2000.0 и радиусом 7.5 . Мы разделили изучаемую область на четыре одинаковых по площади сектора и провели статистический анализ наблюдаемых свойств радиоисточников и космического микроволнового фона. Было показано, что распределение по физическим параметрам (плотность потока, тип радиоспектра, спектральный индекс радиоисточников) и свойства фонового излучения в области размером $44.2 \square^\circ$ соответствуют космологическому принципу, в то

время как количество и морфологический тип радиоисточников существенно отличаются на различных площадках. Это говорит о том, что проведение исследований на участках неба данного размера при анализе СМВ может дать статистически верную картину на высоких мультиполях (соответствующих размеру области), в то время как обобщение результатов подсчетов объектов в малой области на все небо, а также анализа их эволюционных морфологических характеристик как данных полной популяции, не очевидны.

Кроме того, в работе был обнаружен сдвиг в распределении отклика в направлении на радиоисточники на карте реликтового излучения в положительную сторону на уровне 2σ . Средний сигнал, смещенный в положительную сторону, скорее всего, говорит о присутствии остаточного радиоизлучения от синхротронной и/или от пылевой компоненты родительской галактики. Этот фактор затрудняет упрощенный поиск далеких скоплений галактик по карте СМВ, но может помочь понять малое число (почти на два порядка меньше ожидаемого) обнаруженных кандидатов в скопления галактик с помощью СЗ-эффекта в каталоге Planck.

По данным анализа многочастотных карт Planck подготовлен каталог, содержащий 120 кандидатов в скопления галактик с эффектом Сюняева–Зельдовича, 46 из которых могут быть далекими ($z > 0.7$).

При построении непрерывных радиоспектров применялась база данных радиоастрономических каталогов CATS [30, 55]. В работе использованы система обработки радиоастрономических данных FADPS [50, 56] и пакет GLESP [57, 58] для анализа протяженного излучения на сфере.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны Европейскому космическому агентству ESA за открытый доступ к результатам наблюдений и обработки данных в Planck Legacy Archive. При работе использовались интерфейсы виртуальных обсерваторий NASA — базы данных NED и SkyView.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Авторы выражают свою признательность Фонду поддержки научных, культурных и образовательных инициатив «Траектория» за содействие в проведении данной работы (адрес сайта Фонда: <https://www.traektoriafdn.ru/>).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R. Jimenez, R. Maartens, A. R. Khalifeh, et al., arXiv:1902.11298 (2019).
2. A. G. Riess, S. Casertano, W. Yuan, et al., *Astrophys. J.* **855**, 136 (2018).
3. Y. Akrami et al. (Planck Collab.), arXiv:1807.06205 (2018).
4. R. L. White, R. H. Becker, D. J. Helfand, and M. D. Gregg, *Astrophys. J.* **475**, 479 (1997).
5. D. P. Schneider, P. B. Hall, G. T. Richards, et al., *Astron. J.* **134**, 102 (2007).
6. C. Demetroullas and M. L. Brown, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **456**, 3100 (2016).
7. W. Voges, B. Aschenbach, Th. Boller, et al., *Astron. and Astrophys.* **349**, 389 (1999).
8. W. Brinkmann, S. A. Laurent-Muehleisen, W. Voges, et al., *Astron. and Astrophys.* **356**, 445 (2000).
9. J. N. Douglas, F. N. Bash, F. A. Bozayan, et al., *Astron. J.* **111**, 1945 (1996).
10. Joint IRAS science working group, *Infrared Astronomical Satellite catalogs. The point source catalog. Version 2.0* (1988).
11. O. V. Verkhodanov, V. H. Chavushyan, R. Mujica, et al., *Astronomy Reports* **47**, 119 (2003).
12. C. De Breuck, W. van Breugel, S. A. Stanford, et al., *Astron. J.* **123**, 637 (2002).
13. C. J. Willott, S. Rawlings, M. J. Jarvis, and K. M. Blundell, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **339**, 173 (2003).
14. A. I. Kopylov, W. M. Goss, Yu. N. Parijskij, et al., *Astron. Zh.* **72**, 613 (1995).
15. A. I. Kopylov, W. M. Goss, Yu. N. Parijskij, et al., *Astron. Zh.* **72**, 437 (1995).
16. R. J. McLure, C. J. Willott, M. J. Jarvis, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **351**, 347 (2004).
17. B. P. Venemans, H. J. A. Röttgering, G. K. Miley et al., *Astron. and Astrophys.* **461**, 823 (2007).
18. G. Miley and C. De Breuck, *Astron. Astrophys. Rev.* **15**, 67 (2008).
19. O. V. Verkhodanov and Yu. N. Parijskij, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **55**, 66 (2003).
20. O. V. Verkhodanov and Yu. N. Parijskij, *Radio galaxies and Cosmology (FizMatLit, Moscow, 2009)* [in Russian].
21. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), *Astron. and Astrophys.* **594**, A24 (2016).
22. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), *Astron. and Astrophys.* **594**, A27 (2016).
23. Ya. B. Zeldovich and R. A. Sunyaev, *Astrophys. and Space Sci.* **4**, 301 (1969).
24. O. V. Verkhodanov, E. K. Majorova, O. P. Zhelenkova, et al. *Astrophysical Bulletin* **70**, 156 (2015).
25. O. V. Verkhodanov, E. K. Majorova, O. P. Zhelenkova, et al. *Astronomy Letters* **41**, 457 (2015).
26. O. V. Verkhodanov, N. V. Verkhodanova, O. S. Ulakhovich, et al., *Astrophysical Bulletin* **73**, 1 (2018).
27. J. J. Condon, W. D. Cotton, E. W. Greisen, et al., *Astron. J.* **115**, 1693 (1998).
28. O. V. Verkhodanov, M. L. Khabibullina, E. K. Majorova, and Yu. N. Parijskij, *Astrophysical Bulletin* **63**, 366 (2008).
29. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach and V. N. Chernenkov, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **58**, 118 (2005).
30. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach and V. N. Chernenkov, *Data Science Journal* **8**, 34, (2009).
31. B. L. Fanaroff and J. M. Riley, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **167**, 31p (1974).
32. O. Verkhodanov, H. Andernach, and N. Verkhodanova, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **49**, 53 (2000).
33. O. Verkhodanov, N. Verkhodanova, and H. Andernach, *Astrophysical Bulletin* **64**, 72 (2009).
34. O. V. Verkhodanov, in: *Proc. 27th Radio Astron. Conf. on Problems of modern radio astronomy* (Inst. Appl. Astronomy RAS, St.-Petersburg, 1997), Vol. 1, p. 322 [in Russian].
35. A. Bennett, *Mem. Royal Astron. Soc.* **68**, 163 (1962).
36. J. D. H. Pilkington and P. F. Scott, *Mem. Royal Astron. Soc.* **69**, 183 (1965).
37. C. De Breuck, Y. Tang, A. G. de Bruyn, et al., *Astron. and Astrophys.* **394**, 59 (2002).
38. R. B. Rengelink, Y. Tang, A. G. de Bruyn, et al., *Astron. and Astrophys.* **124**, 259 (1997).
39. P. C. Gregory, W. K. Scott, K. Douglas, and J. J. Condon, *Astrophys. J. Suppl.* **103**, 427 (1996).
40. O. V. Verkhodanov, N. V. Verkhodanova and H. Andernach, *Astronomy Reports* **47**, 110 (2003).
41. J. E. Baldwin, R. C. Boysen, S. E. G. Hales, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **217**, 717 (1985).
42. M. M. McGilchrist, J. E. Baldwin, J. M. Riley, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **246**, 110 (1990).
43. S. E. G. Hales, E. M. Waldram, N. Rees, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **274**, 447 (1995).
44. W. M. Lane, W. D. Cotton, J. F. Helmboldt, and N. E. Kassim, *Radio Science* **47**, ID RS0K04 (2012).
45. G. Colla, C. Fanti, R. Fanti, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **1**, 281 (1970).
46. H. T. Intema, P. Jagannathan, K. P. Mooley, and D. A. Frail, *Astron. and Astrophys.* **598**, A78 (2017).
47. R. Adam et al. (Planck Collab.), *Astron. and Astrophys.* **594**, A1 (2016)
48. O. V. Verkhodanov, Ya. V. Naiden, V. N. Chernenkov, and N. V. Verkhodanova, *Astrophysical Bulletin* **69**, 113 (2014).
49. O. V. Verkhodanov, D. D. Kozlova, and Yu. V. Sotnikova, *Astrophysical Bulletin* **73**, 393 (2018).
50. O. V. Verkhodanov, *ASP Conf. Ser.* **125**, 46 (1997).
51. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.) *Astron. and Astrophys.* **596**, A100 (2016).
52. M. L. Khabibullina and O. V. Verkhodanov, *Astrophysical Bulletin* **64**, 123 (2009).
53. O. V. Verkhodanov, D. I. Solovyov, O. S. Ulakhovich, and M. L. Khabibullina, *Astrophysical Bulletin* **71**, 139 (2016).
54. O. V. Verkhodanov and M. L. Khabibullina, *Astronomy Letters* **36**, 7 (2010).

55. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach, and V. N. Chernenkov, ASP Conf. Ser. **322**, 46 (1997).
56. O. V. Verkhodanov, B. L. Erukhimov, M. L. Monosov, et al., Bull. Spec. Astrophys. Obs. **36**, 132 (1993).
57. A. G. Doroshkevich, O. B. Verkhodanov, P. D. Naselsky, et al., Intern. J. Mod. Phys. **20**, 1053 (2011).
58. O. V. Verkhodanov, A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, et al., Bull. Spec. Astrophys. Obs. **58**, 40 (2005).

Radio Sources of Random Sky Region

A. A. Zaporozhietz and O. V. Verkhodanov

The paper presents the statistical data analysis of radio astronomic surveys in the sky region of a size of 177° at high galactic latitudes. We divided the region into four sectors equal in area and analyzed the observed properties of radio sources and the cosmic microwave background in each sector. The distribution of physical parameters (flux density, radio spectrum type, spectral index of radio sources) as well as the properties of the cosmic microwave background within the region of a size of 177° are shown to correspond to the cosmological principle, while the number of radio sources and their morphological types significantly differ in various areas. This points that studying sky regions of a given size, when analyzing the cosmic microwave background, can yield a statistically correct picture at high multipoles (corresponding to the size of a region), while generalization of the object calculations over the whole sky and their evolutionary morphological characteristics over the total population of sources is not obvious. We detected a positive shift in the response distribution in the direction to the radio sources on the cosmic microwave background map at the 2σ level repeated in all four sectors. According to the analysis of the multi-frequency Planck maps, a catalog has been compiled containing 120 new for galaxy cluster candidates with the Sunyaev–Zeldovich effect, 46 of which may be distant ($z > 0.7$).

Keywords: *radio sources: surveys*