

СТАТИСТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕНТРАЛЬНЫХ РАДИОИСТОЧНИКОВ В ОБЛАСТЯХ С ЭФФЕКТОМ СЮНЯЕВА–ЗЕЛЬДОВИЧА

© 2022 г. Д. И. Соловьев^{1,*}, О. В. Верходанов¹, О. С. Улахович²,
Н. В. Верходанова¹, М. Л. Хабибуллина¹

¹ Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, Россия

² Приволжский (Казанский) Федеральный университет, Казань, Россия

*E-mail: drukhi@ya.ru

Поступила в редакцию 31.03.2020 г.

После доработки 31.03.2022 г.

Принята к публикации 31.03.2022 г.

Исследуются статистические свойства радиисточников каталога WENSS, в направлении на которые на многочастотных микроволновых картах миссии Planck детектируется эффект Сюняева–Зельдовича (СЗ). Построены непрерывные радиоспектры объектов и исследованы распределения спектральных индексов и отклика реликтового излучения в области радиисточников. Проведены подсчеты фоновых объектов в площадках с СЗ-эффектом. Показано, что в направлении на радиисточник с СЗ-эффектом на карте анизотропии реликтового излучения преимущественно наблюдается отрицательный отклик. Построена подвыборка радиисточников, имеющих отождествление с объектами оптического обзора Pan-STARRS. Показано статистическое различие свойств объектов подвыборки и полного исследуемого списка. Для радиисточников, имеющих оптическое отождествление, радиоспектральный индекс по абсолютной величине в среднем меньше, а минимум анизотропии температуры на карте РИ глубже. Эффект может быть использован при селекции кандидатов в далекие скопления галактик.

Ключевые слова: космическое фоновое излучение, каталоги: WENSS, каталог: Pan-STARRS

DOI: 10.31857/S0004629922070064

1. ВВЕДЕНИЕ

Согласно иерархической модели [1], наиболее массивные звездные системы формируются в областях высокой плотности темной материи путем слияния большого количества мелких галактик. При $z \sim 2$, где возраст Вселенной составляет порядка 3.3 млрд. лет¹, скопления галактик, скорее всего, находятся на стадии формирования, поскольку для их вириализации не было достаточно времени. По этой причине их принято называть протокластерами. Наблюдения действительно показывают, что галактики с большим красным смещением преимущественно оказываются в достаточно плотной среде [2–5], и протокластеры с большой вероятностью могут быть найдены в непосредственной близости от этих объектов. Поскольку такие галактики обнаруживаются при больших красных смещениях, их можно рассматривать как маяки, отмечающие скопления галактик или близкие группы на космологических расстояниях.

Построение полной выборки скоплений галактик на всем небе — одна из основных задач современной астрофизики. Скопления галактик — наиболее крупные скопления материи, формирующие крупномасштабную структуру Вселенной. Исследование этих объектов в различные космологические эпохи позволяет восстановить особенности формирования крупномасштабной структуры и измерить космологические параметры независимым способом [6]. Существенным требованием к современному космологическим тестам является возможность применения данных из другой космологической эпохи, отличной от нашей, например, эпохи доминирования вещества ($z > 0.7$). Это позволяет отслеживать динамические особенности Вселенной с лучшей точностью, и многие задачи определения космологических параметров связаны с накоплением данных именно в эту эпоху [6–8].

Множество методов применяется для построения полной выборки скоплений галактик в разных диапазонах длин волн, включающих наблюдения в оптическом [9–11] и рентгеновском [12,

¹ $H_0 = 69.6$ км/с/Мпк, $\Omega_\Lambda = 0.71$, $\Omega_m = 0.29$.

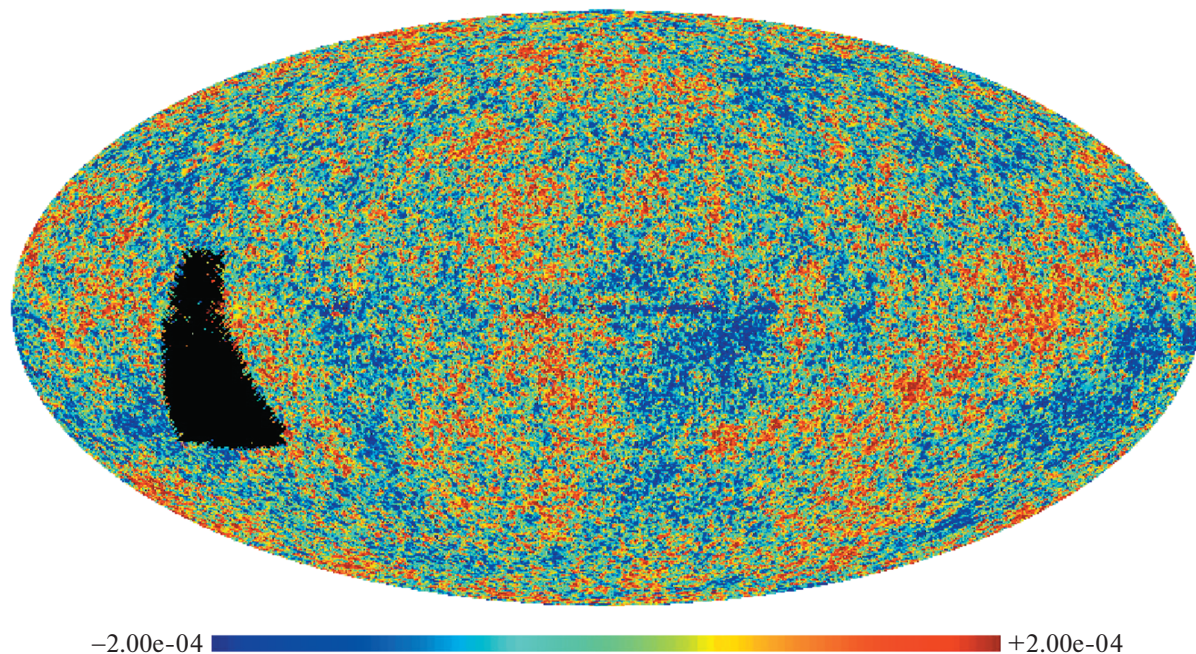


Рис. 1. Положение радиоисточников каталога WENSS [24] из диапазона прямых восхождений $0^{\text{h}} \leq \alpha < 2^{\text{h}}$ и склонений $29^{\circ} < \delta < 78^{\circ}$ на карте CMB SMICA Planck [25]. Карта приведена в галактических координатах.

13] диапазонах, а также миллиметровом и субмиллиметровом [6, 14–16]. Чтобы упростить поиск далеких ($z > 0.7$) скопления галактик, можно использовать априорную информацию о направлениях, в которых их можно потенциально наблюдать, т.е. именно там, где происходят множественные слияния галактик и регистрируются внегалактические радиоисточники [17–21]. Совмещая методы отбора кандидатов в далекие радиоисточники, повышенную плотность фоновых объектов в их направлении, а также наличие в окрестности радиоисточника эффекта Сюняева–Зельдовича [22] по данным микроволновых карт, можно отбирать кандидаты в скопления галактик, в том числе и на больших z .

В данной работе мы продолжаем исследование радиоисточников, которые могут находиться в скоплениях галактик с наблюдаемым эффектом Сюняева–Зельдовича. В первой работе [23] мы построили каталог, содержащий 381 объект, на основании списка радиоисточников Вестерборкского обзора неба [24], который был проведен на частоте 325 МГц в диапазоне прямых восхождений $0^{\text{h}} \leq \alpha < 2^{\text{h}}$ и склонений $29^{\circ} < \delta < 78^{\circ}$ (рис. 1), и с применением многочастотных карт миссии Planck [25] для селекции объектов с эффектом Сюняева–Зельдовича. Отметим, что ранее методика была отработана [26–28] для радиоисточников RC-каталога [29], построенного по данным наблюдений на РАТАН-600, и микроволновых карт космической миссии Planck.

Следует отметить, что использование каталога обзора WENSS (The Westerbork Northern Sky Survey), проведенного на Северном небе с помощью Вестерборкского радиотелескопа в Нидерландах, не случайно. Обзор WENSS [24] был проведен на частоте 325 МГц и имеет предельный уровень плотности потока около 18 мЯн (что соответствует $\sim 5\sigma$). Угловое разрешение радиоинтерферометра составило $54'' \times 54'' \text{cosec}(\delta)$, 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 [18, 30, 31]. Таким образом, применение низкочастотного каталога радиоисточников при поиске объектов с эффектом Сюняева–Зельдовича может помочь найти кандидаты в далекие скопления галактик.

Целью данной работы является детальное исследование означенной группы объектов.

2. АЛГОРИТМ СЕЛЕКЦИИ ОБЪЕКТОВ

Алгоритм отбора кандидатов в объекты с эффектом Сюняева–Зельдовича, примененный в [23], содержит несколько этапов, связанных со свойствами эффекта: депрессия на картах на частотах 70, 100 и 143 ГГц и избыток сигнала на ча-

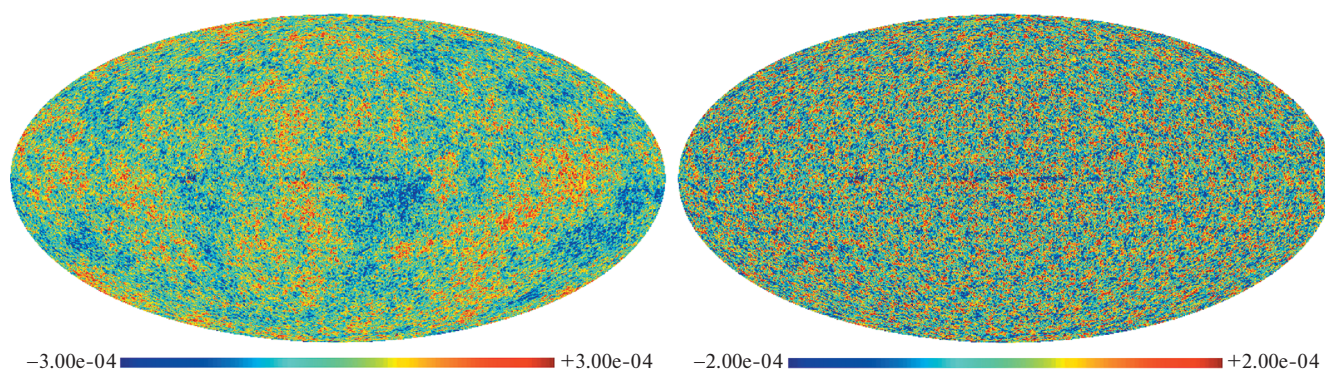


Рис. 2. Карта СМВ SMICA Planck [25]. Слева – карта СМВ с полным набором сферических гармоник ($2 \leq \ell \leq 2500$), справа – карта СМВ с $20 < \ell \leq 2500$.

стотах 353 и 545 ГГц в направлении на скопление галактик. Последовательность шагов селекции следующая.

1. Выделение зоны в окрестности радиоисточников низкочастотного каталога WENSS [24] из карт микроволнового излучения из архива наблюдений обсерватории Planck на частотных картах 100, 143, 217, 353, 545 ГГц и карте реликтового излучения. Страна площадки – $30'$, что превышает размер диаграммы направленности на частоте 217 ГГц примерно в 6 раз (и в три раза поисковый размер, используемый при анализе данных в работах Planck [32]).

2. Выделение потенциальных объектов с СЗ-эффектом с помощью программы поиска и выделения источников “SEtractor” [33] в круге радиусом $7'$ 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 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 [34], уменьшает искажения в площадках (рис. 2), что, в свою очередь, увеличивает контраст меньших неоднородностей. Минимум на карте СМВ наблюдается в направлении скопления галактик с СЗ-эффектом. Такой минимум формируется в результате выполнения процедуры разделения компонентов [35].

Непрерывные радиоспектры отождествляемых объектов, в направлении на которые зафик-

сирован СЗ-эффект, строились с использованием плотностей потоков источников, измеренных в разных обзорах, из базы данных CATS² [36] и процедуры анализа радиоспектров spg [37] системы обработки непрерывных данных на РАТАН-600 [38]. При представлении спектров $S(\nu)$ для дальнейшего вычисления аппроксимационных зависимостей применялась параметризация $S(\nu)$ в формуле $\lg S(\nu) = A + Bx + Cf(x)$, 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 . Этот набор функций далее будем называть стандартными аппроксимационными кривыми (или функциями). Для построения аппроксимационных кривых наряду с данными WENSS также использовались объекты каталогов обзоров, проведенных на других радиотелескопах на разных частотах: NVSS [39], Texas [40], FIRST [41], GB6 [42], 3C [43], B2 [44], VLSS [45], TGSS [46], и других, содержащихся в базе данных CATS.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Исходная выборка объектов каталога WENSS в диапазоне первых двух часов по прямому восхождению содержит 16364 радиоисточников. Автоматический алгоритм по поиску кандидатов в объекты с эффектом Сюняева–Зельдовича отобрал из них 1778 штук ($\sim 10.9\%$). После визуального контроля остался 381 радиоисточник ($\sim 2.3\%$ от начального списка), более подробно о чем можно почитать в отдельной работе [23]. В стандартных базах данных информации о красных смещениях объектов списка не обнаружено. После отождествлений мы провели аппроксимацию непре-

² <http://cats.sao.ru>

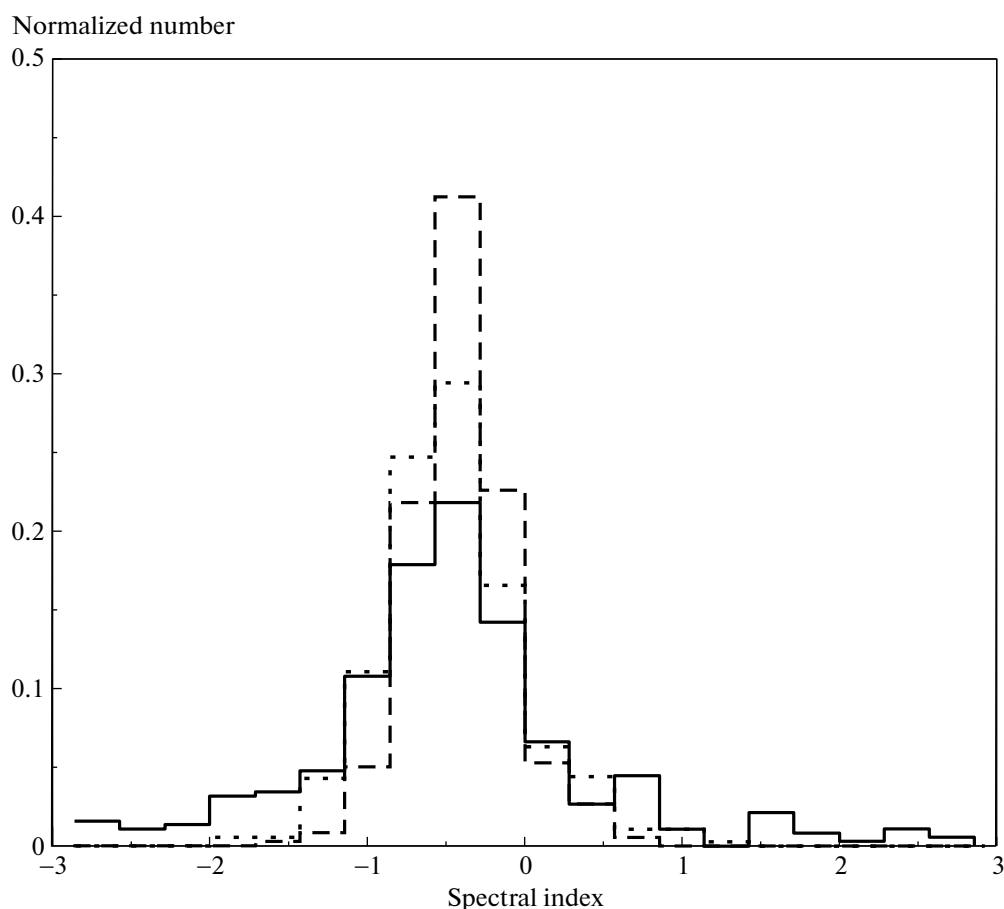


Рис. 3. Нормированное распределение спектральных индексов популяции радиоисточников WENSS с СЗ-эффектом из диапазона R.A. $0^h \leq \alpha < 2^h$ на частотах 325 МГц (сплошная линия), 1.4 (пунктирная линия) и 4.85 ГГц (штриховая линия). Рисунок взят из работы [23].

ровных радиоспектров и провели подсчеты фоновых объектов в окрестности радиоисточников.

На рис. 3 приведена гистограмма распределения радиоспектральных индексов на частотах 325 МГц, 1.4 и 4.85 ГГц для популяции отобранных радиоисточников, полученных путем обработки спектров в пакете FADPS [38, 47]. Распределение уровня флуктуаций на карте СМВ SMICA Planck [25] с мультиполями $20 < \ell \leq 2500$ в направлении на радиоисточники продемонстрировано на рис. 4. На этом рисунке штриховыми 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. Данные нормированы к числу пикселей. Случайные гауссовы реализации неоднородностей СМВ моделировались в рамках космологии Λ CDM с помощью специализированной программы `sl2map` пакета GLESP [48]. Распределение по спектральным индексам (рис. 3) позволяет выделить популяцию источников с предпочтительным наклоном ра-

диоспектра, который описывает радиоизлучение объекта в скоплении с наблюдаемым эффектом Сюняева–Зельдовича. Медианное значение спектрального индекса выборки на частоте 1.4 ГГц оказалось равным $\gamma_{\text{med}} = -0.79 \pm 0.04$ ($S \sim \nu^\gamma$, где S – плотность потока, ν – частота).

Дополнительным свойством выборки, характеризующим популяцию, является отрицательное медианное значение сигнала на карте неоднородностей СМВ SMICA, построенной в диапазоне мультиполей $\ell \in [21-2500]$, в направлении на радиоисточник (см. рис. 5, где показана диаграмма “спектральный индекс γ на частоте 1.4 ГГц – вариация температуры СМВ” (здесь γ – показатель степени в соотношении $S \sim \nu^\gamma$, где S – плотность потока, ν – частота). Спектральный индекс для рис. 5 рассчитывался как тангенс угла наклона касательной на данной частоте к аппроксимационной кривой распределения энергии в непрерывном радиоспектре, представленном в логарифмическом масштабе. Мы сравнили

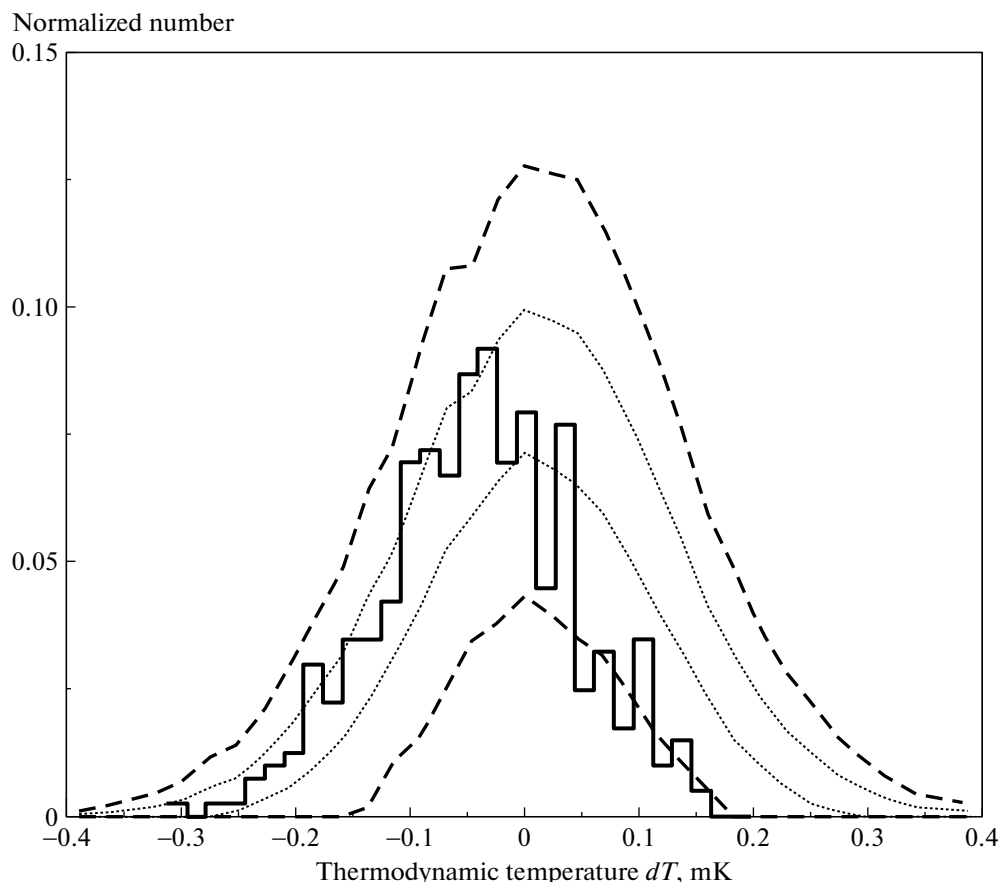


Рис. 4. Распределение уровня флуктуаций CMB в направлении на радиоисточники исследуемой подвыборки (жирная линия). Использована карта CMB SMICA Planck с мультиполями $20 < \ell \leq 2500$. Также показаны распределения $\pm 1\sigma$ (пунктирная линия) и $\pm 3\sigma$ (штриховая линия) уровней флуктуаций в стандартной Λ CDM-космологической модели по данным 200 реализаций случайной гауссовой карты CMB.

распределение откликов на карте CMB SMICA в направлении на радиоисточники с ожидаемым в Λ CDM-космологической модели по данным 200 случайных гауссовых реализаций CMB (рис. 4). 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 .

Кроме того, были проведены подсчеты фоновых объектов в площадках в направлении на радиоисточники. Мы сформировали две выборки направлений на небесной сфере: основную и выборку сравнения. Первая основана на списке кандидатов в объекты с эффектом Сюняева–Зельдовича в направлении на радиоисточники, полученном в результате анализа карт миссии Planck [23]. Для построения выборки сравнения использовались случайно распределенные по сфере направления. С помощью виртуальной об-

серватории SkyView³ [49] и базы данных NED⁴ мы проанализировали количество объектов каталогов SDSS [50], 2MASS [51] и Pan-STARRS [52] в окрестностях радиоисточника в кругах с радиусами $2.5'$ и $2.5''$. Данные обзора SDSS в исследуемой области неполны из-за пересечения с плоскостью Галактики (рис. 1), а в область обзора попадает всего 75 радиоисточников. По данным 2MASS в пятиминутной окрестности 381 радиоисточника можно собрать некоторую статистику, которая не выявляет значимых различий в среднем числе фоновых объектов в окрестности радиоисточников, в направлении на которые обнаруживается СЗ-эффект, и в 381 случайном поле. Для областей размером $5' \times 5'$ с центром в координатах радиоисточников имеет среднее число 35.94 (с медианой 28) объектов из обзора 2MASS с разбросом 43.78, а для случайных полей – 43.77 (с медианой 20) с разбросом 83.58. Тест Колмогорова–

³ <http://skyview.gsfc.nasa.gov>

⁴ <http://ned.ipac.caltech.edu>

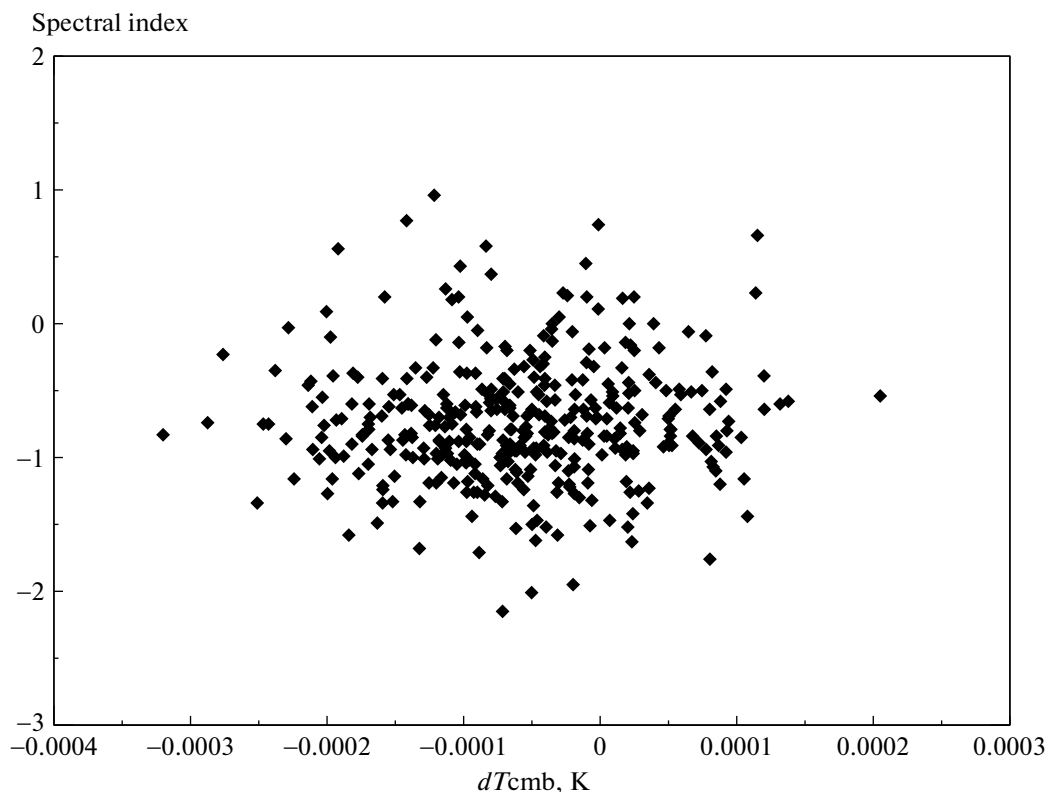


Рис. 5. Диаграмма “спектральный индекс $\gamma_{1.4 \text{ GHz}}$ – вариация СМВ $\delta T_{\ell \in [21; 2500]}$ ” для радиоисточников исследуемой подвыборки.

Смирнова указывает на то, что распределения в направлении на объекты и случайные площадки статистически различны по уровню $pval = 0.05$.

Статистика отождествлений с объектами каталога Pan-STARRS приведена в табл. 1. Каталог радиоисточников (141 объект) WENSS, имеющих отождествление с объектами Pan-STARRS в области с СЗ-эффектом, доступен по приведенному ниже адресу⁵.

Существует небольшое превышение (~ 2.4 раза) в рамках интервала 1σ среднего числа объектов Pan-STARRS в площадке $5'' \times 5''$. На рис. 6 показано распределение спектральных индексов для радиоисточников в области с СЗ-эффектом и с объектами Pan-STARRS. На рис. 7 показано распределение отклика флуктуаций температуры СМВ в направлении на радиоисточник. Тонкими штриховыми линиями на графике отмечены 1σ , 2σ и 3σ -уровни распределения случайных отклонений в Λ CDM по данным 200 смоделированных карт. Диаграмма “спектральный индекс радиоисточника – отклик на карте флуктуаций СМВ” приведена на рис. 8. Сравнение статистических данных по полной выборке из 381 кандидата и по

подвыборке радиоисточников с наличием в зоне отождествления объекта из каталога Pan-STARRS показывает существенное различие в медианных радиоспектральных индексах на частоте 1400 МГц: в первом случае $\gamma = -0.79 \pm 0.04$, во втором $\gamma = -0.52 \pm 0.12$. В то же время распределение отклика на карте неоднородностей СМВ для полной выборки радиоисточников и подвыборки с объектами каталога Pan-STARRS отличаются как формой распределения (см. рис. 4 и 7), так и медианным значением. Медианное значение отклика на карте анизотропии для данных всей нашей выборки -5.645×10^{-5} К, в то время как для подвыборки -6.812×10^{-4} К.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы провели статистический анализ непрерывных радиоспектров радиоисточников WENSS и подсчетов объектов в полях этих радиоисточников из диапазона прямых восхождений $0^h \leq \alpha < 2^h$ и склонений $29^\circ < \delta < 78^\circ$, для которых обнаруживается эффект Сюняева–Зельдовича на многочастотных картах Planck. Исходный каталог [23] содержал 381 объект в заданных координатных интервалах, и на его основе была под-

⁵ http://sed.sao.ru/vo/pub_tab/wenSS2h_id_pans_5s.html

Таблица 1. Количество объектов каталога Pan-STARRS 1 в направлении на выбранные радиоисточники и на случайные площадки

Условие	Среднее в 5'	σ	Среднее в 5'	σ
Направление на кандидаты	216.478	102.371	0.4698	0.7683
Случайные площадки	200.808	451.016	0.1969	0.6195

готовлена подвыборка кандидатов в скопления галактик СЗ-эффектом по данным многочастотных карт Planck с отождествленным радиоисточником. Радиоспектральные индексы для полной выборки наших объектов и подвыборки ($\gamma = -0.79 \pm 0.04$ и -0.52 ± 0.12) с оптическим отождествлением существенно отличаются. Медианное значение отклика на карте анизотропии для данных выборок также различны: для всей выборки -5.645×10^{-5} К, в то время как для подвыборки радиоисточников с отождествлением -6.812×10^{-4} К. Это различие может быть вызвано двумя причинами: 1) физической, когда в малой окрестности радиоисточника наблюдается потенциальный объект на отождествление — галактика скопления, и, следовательно, такое скопле-

ние может быть в среднем более поздним и более массивным, чем потенциально далекие скопления, в которых радиоисточник не отождествляется с оптическим кандидатом. Это приведет к более глубокому минимуму на карте реликтового излучения, получаемой при разделении компонентов за счет весомого вклада сигнала на частотах 100 и 143 ГГц, с отрицательным откликом при СЗ-эффекте; 2) эффект систематики, когда дополнительное излучение галактики на частотах 353 и 545 ГГц, складываясь с избыточным излучением в субмиллиметровом диапазоне, искажает результаты процедуры разделения компонентов и также приводит к более глубокому минимуму на восстановленной карте реликтового излучения в направлении на радиоисточник.

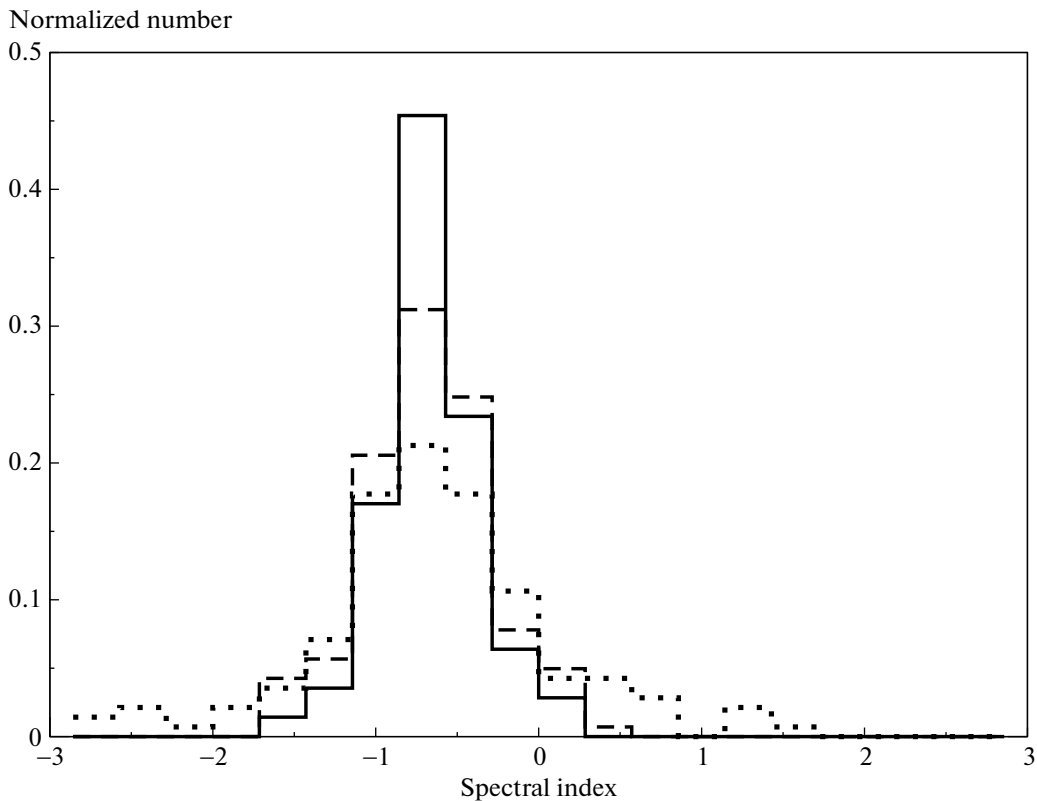


Рис. 6. Нормированное распределение спектральных индексов популяции радиоисточников WENSS с СЗ-эффектом из диапазона $R.A. 0^h \leq \alpha < 2^h$ на частотах 325 МГц (сплошная линия), 1.4 (пунктирная линия) и 4.85 ГГц (штриховая линия) для объектов с отождествлением из каталога Pan-STARRS.

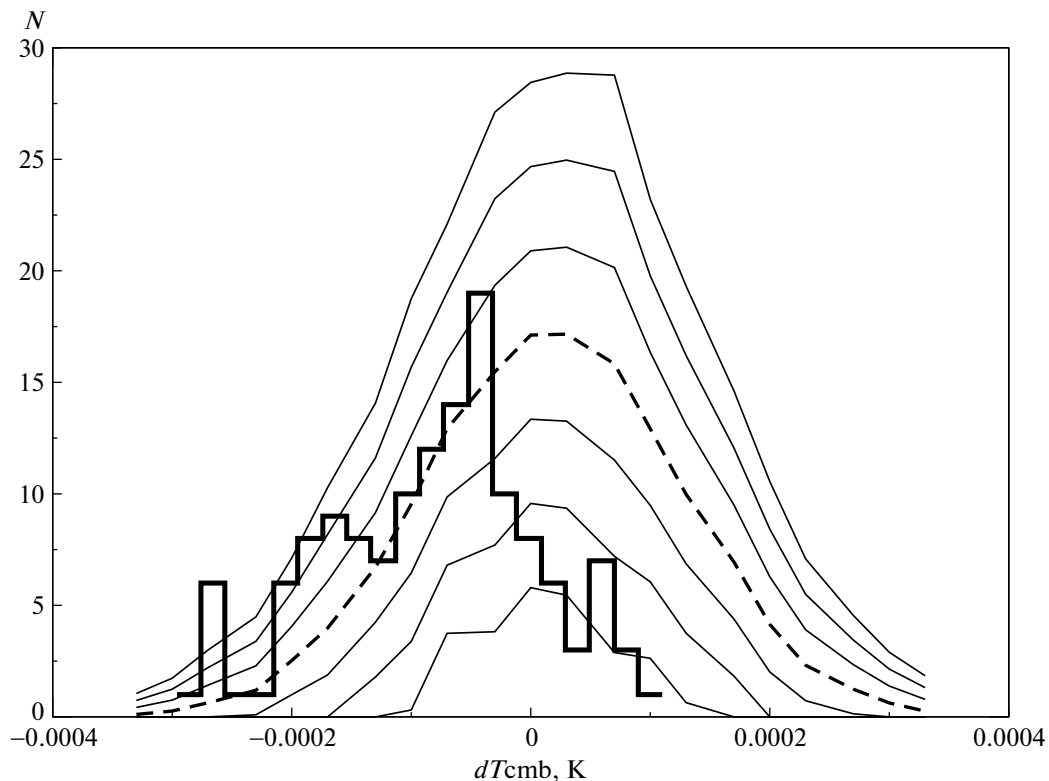


Рис. 7. Распределение уровня флуктуаций СМВ в направлении на радиосточники подвыборки объектов с отождествлением из каталога Pan-STARRS (жирная линия). Использована карта СМВ SMICA Planck с мультиполями $20 < \ell \leq 2500$. Тонкими сплошными линиями показаны распределения уровней флуктуаций $\pm 1\sigma$, $\pm 2\sigma$ и $\pm 3\sigma$ в стандартной Λ CDM-космологической модели по данным 200 реализаций случайной гауссовой карты СМВ.

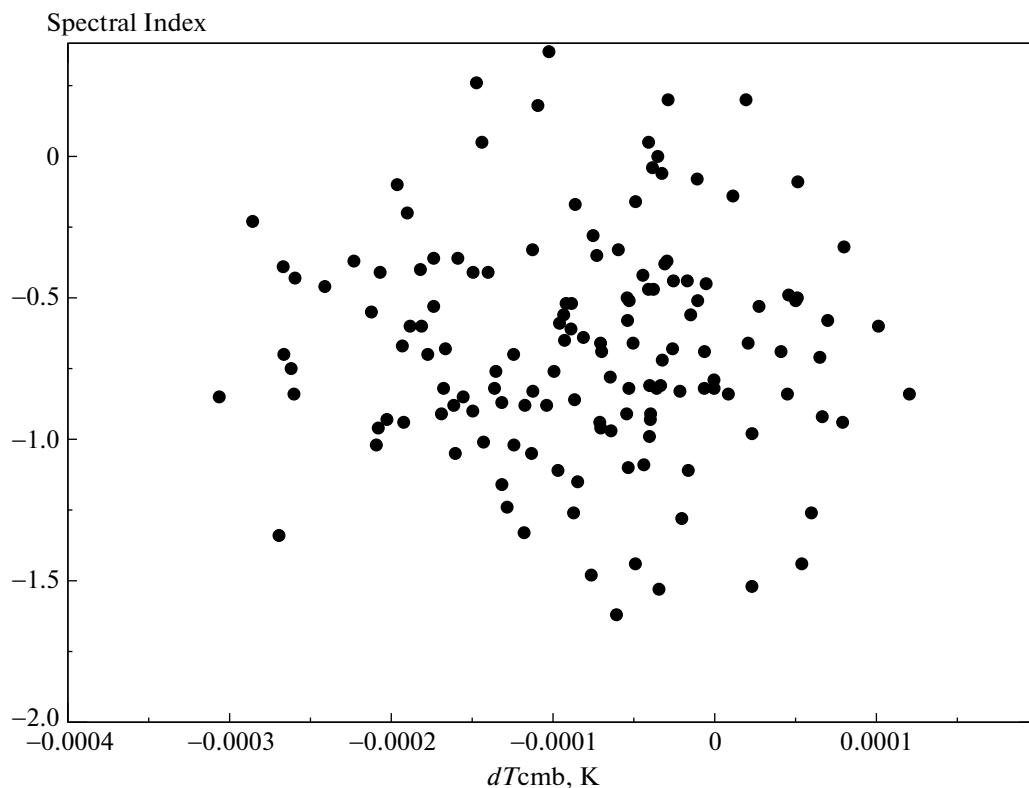


Рис. 8. Диаграмма “спектральный индекс $\gamma_{1.4 \text{ GHz}}$ — вариация СМВ $\delta T_{\ell \in [21; 2500]}$ ” для радиосточников с наличием кандидата в зоне отождествления объекта из каталога Pan-STARRS.

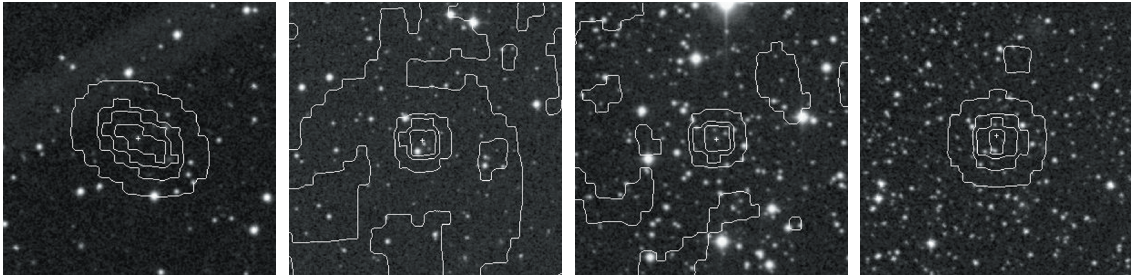


Рис. 9. Примеры структур радиоисточников WENSS с признаками СЗ-эффекта и наличием кандидата на отождествление из обзора Pan-STARRS. Фоновое изображение взято из оптического обзора DSS2 (фильтр R). На изображении наложены радиоизофоты, построенные по данным обзора NVSS. Слева направо радиоисточники WNB0010.2+40 (J001253+403247), WNB0026.9+44 (J002937+442211), WNB0031.2+52 (J003401+531118) и WNB0152.3+65 (J015607+652260). Размер площадок $5' \times 5'$.

Диаграммы (рис. 5 и 8) показывают, что при селекции радиоисточников, в направлении на которые наблюдается СЗ-эффект, можно ускорить процедуру отбора кандидатов в скопления галактик. Кроме самого факта существования радиоисточника, являющегося признаком повышенной пространственной плотности материи, на это же повышение плотности опосредованно указывает минимум на карте анизотропии реликтового излучения. Причем медианное значение радиоспектрального индекса радиоисточников $\gamma = -0.53$. Другим интересным наблюдательным фактом является предпочтительная морфология отождествленных радиоисточников нашей подвыборки: практически все радиоисточники, идентифицированные с объектами Pan-STARRS, являются либо компактными, либо протяженными со структурой типа FR I [53] (см. примеры на рис. 9).

Поиск кандидатов в скопления галактик на основе эффекта Сюняева–Зельдовича является одним из наиболее значимых методов для построения списков скоплений галактик [6, 14–16, 54, 55]. Подтверждение кандидатов в скопления галактик возможно только с помощью измерения красного смещения галактик – членов скопления, но для ускорения процессов их поиска и селекции, построение списков кандидатов является необходимым условием. В настоящее время мы готовим списки для других координатных интервалов обзора WENSS, и дальнейшем мы предполагаем использовать такую селекцию для поиска кандидатов в скопления галактик по данным больших радиообзоров неба, таких как NVSS [39].

Кроме того, обнаруженный эффект для радиоисточников, имеющих оптическое отождествление, когда радиоспектральный индекс по абсолютной величине в среднем меньше, а минимум на карте РИ глубже, может быть использован при поиске кандидатов в далекие скопления галактик. Селекция далеких кандидатов в этом случае основана на наблюдаемой связи радиоспектраль-

ного индекса: чем меньше по отрицательной величине спектральный индекс, тем скорее будет большее красное смещение (см. зависимость в [56]). В то же время более далекие скопления, как ожидается, имеют меньшую массу и, значит, меньшую амплитуду СЗ-эффекта.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны ESA за открытый доступ к результатам наблюдений и обработки данных в Planck Legacy Archive. При построении непрерывных радиоспектров применялась база данных радиоастрономических каталогов CATS [36, 57]. В работе использованы система обработки радиоастрономических данных FADPS [38, 47] и пакет GLESP [48, 58, 59] для анализа протяженного излучения на сфере.

Авторы выражают глубокую признательность рецензенту за высказанные замечания, которые существенно улучшили текст статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *S. D. M. White and M. J. Rees*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **183**, 341 (1978).
2. *J. T. Falder, J. A. Stevens, M. J. Jarvis, M. J. Hardcastle, et al.*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **405**, 347 (2010).
3. *J. A. Stevens, M. J. Jarvis, K. E. K. Coppin, M. J. Page, T. R. Greve, F. J. Carrera, and R. J. Ivison*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **405**, 2623 (2010).
4. *A. Galametz, D. Stern, C. De Breuck, N. Hatch, et al.*, Astrophys. J. **749**, 169 (2012).
5. *J. H. Mayo, J. Vernet, C. De Breuck, A. Galametz, N. Seymour, and D. Stern*, Astron. and Astrophys. **539**, id. A33 (2012).
6. *P. A. R. Ade, N. Aghanim, C. Armitage-Caplan, M. Arnaud, et al.*, Astron. and Astrophys. **571**, id. A20 (2014).
7. *S. Perlmutter and B. P. Schmidt*, in *Supernovae and Gamma-Ray Bursters*, edited by K. Weiler., Lectures Notes in Physics **598**, 195 (2004).

8. *A. G. Riess, L.-G. Strolger, J. Tonry, S. Casertano, et al.*, *Astrophys. J.* **607**, 665 (2004).
9. *M. Klein, S. Grandis, J. J. Mohr, M. Paulus, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **488**, 739 (2019).
10. *J. Gao, Hu Zou, Xu Zhou, and Xu Kong*, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **132**, id. 024101 (2020).
11. *P. Banerjee, E. Pierpaoli, N. Mirzaturun, K. Maamari, and P. Rim*, *New Astronomy* **78**, id. 101359 (2020).
12. *F. Käfer, A. Finoguenov, D. Eckert, N. Clerc, M. E. Ramos-Ceja, J. S. Sanders, and V. Ghirardini*, *Astron. and Astrophys.* **634**, id.A8 (2020).
13. *C. Pinto, A. C. Fabian, J. S. Sanders, and J. de Plaa*, arXiv:1912.03944 [astro-ph.HE] (2019).
14. *M. Klein, H. Israel, A. Nagarajan, F. Bertoldi, F. Pacaud, A. T. Lee, M. Sommer, and K. Basu*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **488**, 1704 (2019).
15. *P. Vanderlinde, T. M. Crawford, T. de Haan, J. P. Dudley, et al.*, *Astrophys. J.* **722**, 1180 (2010), arXiv:1003.0003 [astro-ph.CO].
16. *M. Hasselfield, M. Hilton, T. A. Marriage, G. E. Addison, et al.*, *J. Cosmology and Astroparticle Phys.* **07**, id. 008 (2013), arXiv:1301.0816 [astro-ph.CO].
17. *А. И. Копылов, В. М. Госс, Ю. Н. Парийский, Н. С. Соболева, и др.* *Астрон. журн.* **72**, 613 (1995).
18. *B. P. Venemans, H. J. A. Röttgering, G. K. Miley, W. J. M. van Breugel, et al.*, *Astronom. and Astrophys.* **461**, 823 (2007).
19. *Y. N. Parijskij, W. M. Goss, A. I. Kopylov, N. S. Soboleva, N. S. Temirova, O. V. Verkhodanov, O. P. Zhelenkova, and M. N. Naugolnaya*, *Bull. SAO* **40**, 5 (1996).
20. *G. Miley and C. De Breuck*, *Astron. and Astrophys. Rev.* **15**, 67 (2008).
21. *M. L. Khabibullina and O. V. Verkhodanov*, *Astrophys. Bull.* **64**, 123 (2009), arXiv:0911.3741 [astro-ph.CO].
22. *Ya. B. Zeldovich and R. A. Sunyaev*, *Astrophys. Space Sci.* **4**, 301 (1969).
23. *O. V. Verkhodanov, N. V. Verkhodanova, O. S. Ulakhovich, D. I. Solovoyov, and M. L. Khabibullina*, *Astrophys. Bull.* **73**, 1 (2018).
24. *R. B. Rengelink, Y. Tang, A. G. de Bruyn, G. K. Miley, M. N. Bremer, H. J. A. Roettgering, and M. A. R. Bremer*, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **124**, 259 (1997).
25. *P. A. R. Ade, N. Aghanim, M. I. R. Alves, C. Armitage-Caplan, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **571**, id. A1 (2014), arXiv:1303.5062 [astro-ph.CO].
26. *O. V. Verkhodanov, E. K. Majorova, O. P. Zhelenkova, M. L. Khabibullina, D. I. Solovoyov, and Yu. N. Parijskij*, *Astrophys. Bull.* **70**, 156 (2015).
27. *О. В. Верходанов, Е. К. Майорова, О. П. Желенкова, Д. И. Соловьев, М. Л. Хабибуллина*, *Письма в Астрон. журн.* **41**, 499 (2015).
28. *О. В. Верходанов, Е. К. Майорова, О. П. Желенкова, Д. И. Соловьев, М. Л. Хабибуллина*, *Астрон. журн.* **93**, 616 (2016).
29. *Yu. N. Parijskij, N. N. Bursov, N. M. Lipovka, N. S. Soboleva, A. V. Temirova, and A. V. Chepurinov*, *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **96**, 583 (1992).
30. *А. И. Копылов, У. М. Госс, Ю. Н. Парийский, Н. С. Соболева, О. В. Верходанов, А. В. Темирова, О. П. Желенкова*, *Письма в Астрон. журн.* **32**, 483 (2006), arXiv:0705.2971 [astro-ph].
31. *Yu. N. Parijskij, P. Thomasson, A. I. Kopylov, O. P. Zhelenkova, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **439**, 2314 (2014).
32. *P. A. R. Ade, N. Aghanim, F. Argueso, M. Arnaud, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **594**, id. A26 (2016), arXiv:1507.02058 [astro-ph.CO].
33. *E. Bertin and S. Arnouts*, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **117**, 393 (1996).
34. *P. D. Naselsky, P. R. Christensen, P. Coles, O. V. Verkhodanov, D. I. Novikov, and J. Kim*, *Astrophys. Bull.* **65**, 101 (2010), arXiv:0712.1118 [astro-ph].
35. *R. Adam, P. A. R. Ade, N. Aghanim, M. I. R. Alves, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **594**, id. A10 (2016), arXiv:1502.01588 [astro-ph.CO].
36. *O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach, V. N. Chernenkov*, *Bull. SAO* **58**, 118 (2005), arXiv:0705.2959 [astro-ph].
37. *О. В. Верходанов*, в сб. *Проблемы современной радиоастрономии* (Санкт-Петербург: ИПА РАН, 1997), т.1, с. 322.
38. *O. V. Verkhodanov*, in *Astronomical Data Analysis Software and Systems VI*, edited by *G. Hunt and H. E. Payne*, *ASP Conf. Ser.* **125**, 46 (1997).
39. *J. J. Condon, W. D. Cotton, E. W. Greisen, Q. F. Yin, R. A. Perley, G. B. Taylor, and J. J. Broderick*, *Astron. J.* **115**, 1693 (1998).
40. *J. N. Douglas, F. N. Bash, F. A. Bozayan, G. M. Torrence, and C. Wolfe*, *Astron. J.* **111**, 1945 (1996).
41. *R. L. White, R. H. Becker, D. J. Helfand, and M. D. Gregg*, *Astrophys. J.* **475**, 479 (1997).
42. *P. C. Gregory, W. K. Scott, K. Douglas, and J. J. Condon*, *Astrophys. J. Suppl.* **103**, 427 (1996).
43. *A. Bennett*, *Mem. Roy. Astron. Soc.* **68**, 163 (1962).
44. *G. Colla, C. Fanti, R. Fanti, L. Formiggini, et al.*, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **1**, 281 (1970).
45. *W. M. Lane, W. D. Cotton, J. F. Helmboldt, and N. E. Kassim*, *Radio Science* **47**, id. RS0K04 (2012).
46. *H. T. Intema, P. Jagannathan, K. P. Mooley, and D. A. Frail*, *Astron. and Astrophys.* **598**, id. A78 (2017), arXiv:1603.04368 [astro-ph.CO].
47. *O. V. Verkhodanov, B. L. Erukhimov, M. L. Monosov, V. N. Chernenkov, and V. S. Shergin*, *Bull. SAO* **36**, 132 (1993).
48. *A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov, D. I. Novikov, V. I. Turchaninov, I. D. Novikov, P. R. Christensen, L.-Y. Chiang*, *Intern. J. Modern Physics D* **14**, 275 (2003), arXiv:astro-ph/0305537.
49. *T. McGlynn, K. Scollick, and N. White*, in *New Horizons from Multi-Wavelength Sky Surveys*, Proc. 179th Symp. IAU, held in Baltimore, USA August 26–30, edited by *B. J. McLean, D. A. Golombek, J. J. E. Hayes, and H. E. Payne* (Kluwer Acad. Publ., 1996), p. 465, <https://skyview.gsfc.nasa.gov/current/docs/jar.html>
50. *K. N. Abazajian, J. K. Adelman-McCarthy, M. A. Agüeros, S. S. Allam, et al.*, *Astrophys. J. Suppl.* **182**, 543 (2009), arXiv:0812.0649 [astro-ph].

51. *R. M. Cutri, M. F. Skrutskie, S. Van Dyk, C. A. Beichman, et al., Explanatory Supplement to the 2MASS Second Incremental Data Release (2002)*, <http://www.ipac.caltech.edu/2mass>.
52. *K. C. Chambers, E. A. Magnier, N. Metcalfe, H. A. Flewelling, et al.*, arXiv:1612.05560 [astro-ph.IM] (2016).
53. *B. L. Fanaroff and J. M. Riley*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **167**, 31P (1974).
54. *R. A. Burenin*, Astron. Letters **43**, 507 (2017), arXiv:1703.05597 [astro-ph.CO].
55. *V. Bonjean*, Astron. and Astrophys. **634**, id. A81 (2020), arXiv:1911.10778 [astro-ph.CO].
56. *О. В. Верходанов, М. Л. Хабибуллина*, Письма в Астрон. журн. **36**, 9 (2010), arXiv:1003.0577 [astro-ph.CO].
57. *О. В. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach, and V. N. Chernenkov*, Data Science J. **8**, 34 (2009), arXiv:0901.3118 [astro-ph.IM].
58. *О. В. Verkhodanov, A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, D. I. Novikov, V. I. Turchaninov, I. D. Novikov, P. R. Christensen, and L.-Y. Chiang*, Bull. SAO **58**, 40 (2005).
59. *A. G. Doroshkevich, O. V. Verkhodanov, P. D. Naselsky, J. Kim, et al.*, Intern. J. Modern Physics D **20**, 1053 (2011), arXiv:0904.2517.