

УДК 524.827-77

ПОИСК КАНДИДАТОВ В ОБЪЕКТЫ С ЭФФЕКТОМ СЮНЯЕВА–ЗЕЛЬДОВИЧА НА КАРТАХ ПЛАНК В ОКРЕСТНОСТЯХ РАДИОИСТОЧНИКОВ RCR-КАТАЛОГА

© 2020 Е. К. Майорова^{1*}, **О. В. Верходанов**¹, О. П. Желенкова¹¹ Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 24 апреля 2019 года; после доработки 15 октября 2019 года; принята к публикации 15 октября 2019 года

С помощью архивных карт миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов проведен отбор потенциальных кандидатов в объекты Сюняева–Зельдовича (СЗ) вблизи радиодисточников каталога RCR (RATAN Cold Refined). Исследованы свойства «горячих» и «холодных» пятен в диапазоне прямых восхождений $2^{\text{h}} \leq \text{RA} \leq 17^{\text{h}}$ и полосе склонения $\text{Dec}_{2000} = 4^{\circ}59' \pm 15'$. Во всей полосе обнаружено 135 кандидатов в объекты Сюняева–Зельдовича. 86 объектов находятся менее чем в $7'$ от источников каталога RCR. Наиболее надежно эффект проявляется вблизи 25 RCR-источников. Вблизи подавляющего большинства пятен с эффектом Сюняева–Зельдовича располагаются скопления галактик или радиодисточники. Проведены статистические исследования распределения радиоспектральных индексов объектов и сигнала на микроволновых картах в направлении на радиодисточники. Показано, что ряд объектов в микроволновом диапазоне ассоциируется с источниками с инвертированным спектром.

Ключевые слова: космическое фоновое излучение

1. ВВЕДЕНИЕ

Появление полного обзора неба в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах, который был проведен космической обсерваторией Planck, способствовало решению большого числа астрофизических и космологических задач. Достаточно высокая чувствительность обзора и угловое разрешение порядка $5'$ позволили проводить исследования как точечных источников разных популяций, так и протяженных, ассоциированных со скоплениями галактик с размерами от нескольких до десятков минут дуги.

Одной из основных задач, заявленных миссией Planck, был поиск и изучение скоплений галактик в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах, наблюдаемых благодаря эффекту Сюняева–Зельдовича (СЗ) (Delabrouille et al. 2013). Это направление остается приоритетным в космологических исследованиях, поскольку позволяет проследить эволюцию масс скоплений и особенности формирования крупномасштабной структуры Вселенной в различные космологические эпохи. Отметим, что эффект СЗ не зависит от красного смещения. Поиск кандидатов в скопления галактик и их отбор по эффекту Сюняева–Зельдовича (Zeldovich

and Sunyaev 1969) стали особенно актуальны, когда началось активное обсуждение нестыкровок в измерениях различных наблюдательных экспериментов постоянной Хаббла и других космологических параметров (Akrami et al. 2018, Riess et al. 2018), поскольку данные о скоплениях могут сыграть здесь важную роль (Ade et al. 2014b).

По результатам наблюдений миссии Planck был подготовлен каталог, содержащий 1653 скопления галактик и кандидатов в скопления, в которых проявляется эффект Сюняева–Зельдовича. 1203 из них на момент публикации архива данных Planck были подтверждены оптическими наблюдениями (Ade et al. 2016b). Первые данные обсерватории Planck показали, что зарегистрированное число скоплений галактик (около 1.6 тысяч), наблюдаемых с помощью СЗ-эффекта, значительно (на два порядка) меньше, чем ожидается по данным оптических обзоров и по моделированию. На результаты обнаружения могли влиять некоторые селекционные эффекты. Это и трудноудаляемое фоновое излучение нашей Галактики, и точечные источники излучения.

В данной работе мы развиваем предложенный ранее (Verkhodanov et al. 2016) метод селекции кандидатов в скопления галактик с помощью каталогов радиодисточников и карт космического

*E-mail: len@sao.ru

микроволнового фонового излучения. Суть метода заключается в использовании космологических свойств формирования мощных внегалактических радиоисточников. Такие объекты принадлежат популяции галактик самой высокой светимости, что позволяет 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 тот факт, что их родительскими галактиками являются гигантские эллиптические галактики (gE), которые в принципе могут использоваться как стандартные линейки и часы (Gurvits et al. 1999, Verkhodanov and Parijskij 2009, Verkhodanov et al. 2005a).

Поиск кандидатов в объекты с эффектом СЗ в окрестностях радиоисточников на многочастотных картах Planck был предпринят в работе Verkhodanov et al. (2018). В ней исследовались окрестности радиоисточников обзора WENSS. В настоящей работе для этих целей мы будем использовать объекты RCR-каталога. Для него характерна существенная доля источников с крутыми и ультракрутыми спектрами, которые часто ассоциируются с далекими радиогалактиками (Kopylov et al. 2006, Parijskij et al. 2014, Venemans et al. 2007). Практически все объекты RCR-каталога являются мощными радиоисточниками со светимостями $L_{1.4\text{ГГц}} \gtrsim 10^{24}$ Вт Гц⁻¹ на частоте 1.4 ГГц (Zhelenkova et al. 2013).

Исследования микроволнового фона на картах Planck в окрестностях RCR-источников уже предпринимались в работах Verkhodanov et al. (2015a; b; 2016). Было показано, что на картах Planck, содержащих сигналы как частотных каналов, так и очищенного СМВ, на уровне ниже порога чувствительности (менее 4σ) регистрируется достаточно большое число точечных внегалактических источников разных спектральных индексов. Это подтвердило гипотезу о повышенной вероятности появления положительного отклика¹ на картах микроволнового фона, если в исследуемой области заведомо присутствует радиогалактика (Ade et al. 2015).

2. ДАННЫЕ

2.1. Карты миссии Planck

Наблюдения миссии проводились с августа 2009 г. по октябрь 2013 г. в девяти частотных полосах на высокочастотном комплексе HFI (High Frequency Instrument) с центральными частотами полос 100, 143, 217, 353, 545, 857 ГГц и на низкочастотном LFI (Low Frequency Instrument)

с центральными частотами 30, 44, 70 ГГц (Ade et al. 2014a, Akrami et al. 2018).

Карты спутника Planck² (Ade et al. 2014a) Европейского космического агентства (ESA) были открыты для научного сообщества в 2013 г. Основные результаты миссии представлены на сайте www.cosmos.esa.int/web/planck/publications. Архив миссии (Planck Legacy Archive — PLA³) содержит как карты компонент микроволнового излучения, так и каталоги обнаруженных источников галактического и внегалактического происхождения.

Для решения поставленной задачи мы использовали многочастотные карты архива Planck, представленные в виде карт в пикселизации GLESP (Doroshkevich et al. 2011, Verkhodanov et al. 2005). Разрешение карт соответствует размеру диаграммы направленности с оверпикселизацией до максимального номера мультиполя $l_{\text{max}} = 4048$. Карты в пикселизации GLESP и коэффициенты их гармонического разложения на мультиполи доступны на сайте cmb.sao.ru (Verkhodanov et al. 2014).

2.2. Каталог RCR

Для поиска кандидатов в скопления галактик на картах микроволнового фонового излучения Planck нами был выбран RCR-каталог (RATAN Cold Refined). Этот каталог (Majorova et al. 2015, Soboleva et al. 2010, Zhelenkova et al. 2013; 2017) является уточненной версией каталога RC (RATAN Cold) (Parijskij et al. 1991; 1993), который был получен в эксперименте «Холод» (Pariiskii and Kogolkov 1986), проводившемся на радиотелескопе RATAN-600 в 80-х годах на частоте 3.94 ГГц. Каталог содержит данные о 830 источниках, обнаруженных на усредненных сканах обзоров полосы неба, проводившихся на склонении микроквара SS 433 (Dec₂₀₀₀ = 4°59' ± 20') в 1980–1999 гг. в диапазоне прямых восхождений $2^{\text{h}} \leq \text{RA} \leq 17^{\text{h}}$. Предельная чувствительность RCR-каталога на уровне 3σ составила порядка 10 мЯн. Примерно для 10% объектов каталога имеются данные о плотностях потока только на двух частотах: 1.4 ГГц (NVSS) и 3.94 ГГц (RCR) (Zhelenkova and Majorova 2018). В основном это источники с плотностями потоков менее 30 мЯн. Около 90% радиоисточников RCR-каталога были отождествлены с оптическими объектами (Zhelenkova et al. 2013).

¹В дальнейшем мы будем называть их «горячими» пятнами.

²<http://www.rssd.esa.int/Planck/>

³<http://pla.esac.esa.int/>

В работе Zhelenkova and Majorova (2018) было проведено исследование спектров источников каталога RCR в частотном диапазоне 72 МГц–4.85 ГГц с привлечением данных каталогов GLEAM (Hurley-Walker 2017) и TGSS (Intema et al. 2017) и оценочных значений плотностей потоков, полученных по картам обзоров VLSSr (Lane et al. 2014), GLEAM, TGSS и GB6 (Gregory et al. 1996)⁴. Это позволило получить надежные данные о спектральных индексах радиисточников. Оказалось, что больше половины источников каталога имеют крутые (SS, Steep Spectrum) и ультракрутые (USS, Ultra Steep Spectrum) спектры⁵, что позволяет ассоциировать эти объекты с далекими радиогалактиками (Korylov et al. 2006, Parijskij et al. 2014, Venemans et al. 2007). Источники с плоскими спектрами, чьи родительские объекты чаще всего — квазары, также могут находиться на больших красных смещениях⁶.

Изучая особенности микроволнового фона на картах Planck вблизи RCR-радиисточников с целью обнаружения эффекта СЗ, который является эффективным методом поиска кандидатов в скопления галактик, мы провели поиск потенциальных кандидатов.

3. АНАЛИЗ ДАННЫХ

3.1. Поиск эффекта Сюняева–Зельдовича на картах Planck

Различают два вида эффекта Сюняева–Зельдовича: тепловой (tSZ), когда фотоны рассеиваются при случайном движении тепловых электронов, и кинематический (kSZ), обусловленный общим объемным движением электронов (Sunyaev and Zeldovich 1980, Sunyaev et al. 1972). В первом случае рассеянные фотоны СМВ имеют спектральную зависимость, во втором — при kSZ-эффекте — спектр остается планковским. При действии теплового эффекта Сюняева–Зельдовича на низких наблюдательных частотах Planck в направлении на скопление будет регистрироваться недостаток фотонов из-за увеличения их энергии. Это приведет

к появлению в области скопления галактик «ямки» или «холодного» пятна на карте в миллиметровом диапазоне. За счет увеличения числа фотонов с большей энергией в субмиллиметровом диапазоне в направлении на скопление будет наблюдаться локальный пик излучения. Физически эффект СЗ связан с обратным комптоновским взаимодействием фотонов СМВ и свободными электронами горячего газа скоплений галактик. В результате рассеяния эффективный спектр отклоняется от чернотельного. Единственный свободный параметр — параметр комптонизации Y_{SZ} , который описывается просто амплитудой. Микроволновой спектр скопления галактик, наблюдаемый в результате эффекта СЗ, приводит к отрицательному сигналу («холодному» пятну) на частотах 30–143 ГГц и положительному («горячему» пятну) на частотах свыше 217 ГГц. Эта особенность является уникальным наблюдательным проявлением, позволяющим выделять его среди других вариаций фона.

Следуя этой особенности проявления эффекта Сюняева–Зельдовича, при отборе кандидатов мы пытались обнаружить «горячие» пятна вблизи источников RCR-каталога на частотных картах Planck выше 353 ГГц и совпадающие с ними по положению «холодные» пятна на частотных картах ниже 217 ГГц.

Предварительная процедура заключалась в выделении зоны определенных размеров на картах Planck в окрестности RCR-источника. С этой целью из архивных карт с помощью процедуры `marcut` пакета GLESP⁷ (Verkhodanov et al. 2005) вырезались площадки размером 30' × 30', центры которых совпадали с координатами RCR-радиисточников на частотных картах Planck и на карте реликтового излучения. Размер площадки превышал размер диаграммы направленности на частоте 217 ГГц примерно в шесть раз (и в три раза поисковый размер, используемый при анализе данных в работах Planck Ade et al. (2016a)).

Поиск потенциальных СЗ-источников осуществлялся как методом, предложенным в работе Verkhodanov et al. (2018), так и визуально. Результаты визуального поиска подтверждались в дальнейшем посредством измерения параметров пятен с помощью программы SExtractor (Bertin and Arnouts 1996). Для осуществления метода, описанного в работе Verkhodanov et al. (2018), были разработаны программы на языке командного интерпретатора `shell`. Для визуального контроля совпадения пятен с RCR-объектами и измерения расстояний от источника до центра пятна использовалось программное приложение Aladdin (Boch et al. 2014, Bonnarel et al. 2000).

⁴При построении спектров использовалась вся имеющаяся информация о плотностях потоков, доступная с помощью ресурсов CATS (Verkhodanov et al. 2005b), Vizier (Ochsenbein et al. 2000) и NED (NASA/IPAC Extragalactic Database).

⁵Медианные значения спектральных индексов на частоте 3.94 ГГц для источников SS- и USS-групп соответственно $Sp.Ind_{3.94} = -0.77$ и $Sp.Ind_{3.94} = -1.12$. Доля SS-источников составила 52%, USS — 14% от общего числа объектов.

⁶Среди источников каталога RCR самая далекая радиогалактика имеет красное смещение $z = 4.514$ (Korylov et al. 2006), самый далекий квазар $z = 3.345$.

⁷<http://www.glesp.nbi.dk>

Отбирались пятна, чьи центры удалены от RCR-источников на расстояния, не превышающие $7'$ (при ширине диаграммы направленности телескопа Planck на частотах выше 217 ГГц порядка $5'$). Координаты таких RCR-источников выделены в таблице 1 курсивом.

Следует отметить, что при визуальном обследовании площадок на картах Planck мы расширили поиск потенциальных источников СЗ. Поиск таких объектов проводился по всему полю исследуемых площадок $30' \times 30'$. Фиксировались пятна, удовлетворяющие условиям эффекта СЗ и удаленные от центров площадок более чем на $7'$. Координаты RCR-объектов, совпадающие с центрами площадок, где были найдены такие пятна, приведены в таблице 1 обычным шрифтом. В процессе отбора пятен с возможным эффектом СЗ проводилось также сравнение амплитуды пятен на частотах 100 и 143 ГГц⁸ и проверка наличия положительного сигнала на частоте 217 ГГц.

Кроме того, было проведено сравнение различных релизов данных обсерватории Planck на масштабах $30'$. Можно заключить, что на таких угловых масштабах в направлении на RCR-объекты различия в данных Релизов 2 и 3 незначительны.

3.2. Анализ результатов поиска

Результаты визуального и автоматизированного отбора пятен с возможным эффектом СЗ приведены в таблице 1⁹. В колонке (1) приводится список источников RCR-каталога, вблизи которых обнаружены потенциальные объекты с эффектом СЗ на картах Planck. Координаты источников совпадают с центрами площадок $30' \times 30'$, вырезанных на многочастотных картах. Курсивом выделены координаты RCR-источников, расстояние от которых до пятен с эффектом СЗ не превышает $7'$, обычным шрифтом — те, расстояние до которых превышает $7'$. Символом «#» отмечены источники, около которых пятна с возможным эффектом СЗ найдены как с помощью программы, описанной в работе Verkhodanov et al. (2018), так и визуально с последующим подтверждением программой SExtractor. В колонке (2) приведены величины спектральных индексов RCR-радиоисточников на частоте 3.94 ГГц. Колонка (3) содержит координаты центра пятна с возможным эффектом СЗ. Знак «*» указывает на положительную амплитуду пятна на частоте 100 ГГц. Колонка (4) — координаты

оптически детектированных скоплений галактик, расположенных в непосредственной близости от пятен с возможным эффектом СЗ. Колонка (5) — расстояние от скоплений галактик до центра пятна с возможным эффектом СЗ в угловых минутах. Колонка (6) — красное смещение скоплений галактик. Спектральные красные смещения выделены курсивом, фотометрические — даны обычным шрифтом. Колонка (7) — координаты RCR- и NVSS-источников, расположенных в непосредственной близости от пятен с возможным эффектом СЗ. Колонка (8) — расстояние от указанных в колонке (7) источников до центров пятен в угловых минутах. Колонка (9) — красные смещения родительских галактик RCR- и NVSS-источников из колонки (7). Спектральные красные смещения выделены курсивом, фотометрические — приведены обычным шрифтом. Колонка (10) — комментарии: символы «!!!», «!!», «!» и «?» обозначают степень уверенности в наличии эффекта СЗ в порядке убывания, Pl — пятно отождествлено с источником из каталога Planck на одной или нескольких частотах в диапазоне 353–857 ГГц.

Информация о скоплениях галактик в полосе RAJ 30° – 255° и DecJ $3^\circ 8$ – $5^\circ 9$ была взята из нескольких каталогов (Banerjee et al. 2018, Gal et al. 2009, Lopes et al. 2004, Oguri 2014, Rykoff et al. 2014; 2016, Szabo et al. 2011, Tempel et al. 2017, Wen and Han 2015, Wen et al. 2012). Ниже приводится перечень каталогов скоплений галактик с указанием их глубины в фотометрических полосах и соответствующего диапазона фотометрических (z_{ph}) или спектральных (z_{sp}) красных смещений:

- Northern Optical Cluster Survey (Gal et al. 2009, Lopes et al. 2004) на основе обзора DPOSS-II: $R_F \sim 20.8^m$ ($r \sim 20.5^m$), $I_N \sim 19.5^m$ ($i \sim 19.8^m$) и $z_{ph} \lesssim 0.25$;
- redMaPPer cluster catalog (Rykoff et al. 2014) и (Rykoff et al. 2016) на основе DR8 SDSS: $r < 22.7^m$, $i < 22.2^m$ и $0.08 < z_{ph} < 0.6$; на основе DES: $r \sim 24.1^m$, $i \sim 23.4^m$ и $0.2 < z_{ph} < 0.9$;
- Clusters of galaxies in SDSS-III (Wen and Han 2015, Wen et al. 2012): DR12 SDSS, $r < 22.7^m$, $i < 22.2^m$ и $0.05 < z_{ph} < 0.8$;
- CAMIRA SDSS DR8 cluster catalogue (Oguri 2014): $r < 22.7^m$, $i < 22.2^m$ и $0.1 < z_{ph} < 0.6$;
- SDSS DR9 galaxy clusters optical catalog (Banerjee et al. 2018): $r < 22.7^m$, $i < 22.2^m$ и $0.05 < z_{ph} < 0.64$;
- Merging groups and clusters from the SDSS data (Tempel et al. 2017): DR12 SDSS, $r < 22.7^m$, $i < 22.2^m$ и $0.01 < z_{sp} < 0.20$;

⁸Пятно на частоте 100 ГГц должно быть «холоднее» пятна на частоте 143 ГГц.

⁹Таблица целиком доступна по ссылке: https://www.sao.ru/hq/len/Cluster/Tab1_1/

Таблица 1. Список отобранных источников каталога RCR, вблизи которых на картах Planck обнаружены потенциальные объекты с эффектом СЗ. Курсивом выделены координаты тех RCR-источников, расстояние от которых до объектов с эффектом Сюняева–Зельдовича не превышает $7'$, обычным шрифтом — более $7'$. Символом «#» отмечены RCR-источники, около которых пятна с возможным эффектом СЗ найдены как с помощью программы, описанной в работе Verkhodanov et al. (2018), так и визуально с последующим подтверждением программой SExtractor. В столбцах (2) и (3) приводятся соответственно спектральные индексы RCR-источников на частоте 3.94 ГГц и координаты потенциальных объектов с эффектом СЗ; в столбцах (4) и (6) — соответственно координаты и красные смещения оптически детектированных скоплений галактик, расположенных в непосредственной близости от объектов с эффектом СЗ, в столбцах (7) и (9) — координаты RCR- и NVSS-источников, удаленных от пятен с эффектом СЗ не более чем на $7'$, и красные смещения их родительских галактик. Спектральные красные смещения выделены курсивом, фотометрические — даны обычным шрифтом. Расстояния от скоплений галактик и радиоисточников до центров пятен с предполагаемым эффектом СЗ приведены в столбцах (5) и (8)

RCR source Dec RA	Sp.Ind. _{3.94}	SZ Dec RA	Cluster Dec RA	Δl_{cl} , arcmin	z_{cl}	NVSS name	Δl_s arcmin	z_s	Com.
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
<i>020651+044828</i> (020638+044808)	-0.30 -0.76	020650+045018	020638.9+044804	3.8	<i>0.253</i>	<i>020651+044828</i> 020638+044808 020644+044946 020636+045348 020639+045436	2.7 3.5 1.5 4.9 5.1	<i>0.253</i>	!!
<i>020912+050051#</i>	-1.14	020904+050143 020845+045324				<i>020912+050051</i> 020858+045908 020853+045122 020834+045045	2.0 2.0 2.4 2.4	<i>0.285</i>	! !!
<i>020931+045535</i>	-0.78	020936+045358	020931.8+045317	1.2	<i>0.153</i>	<i>020931+045535</i> 020928+045235 020945+045251	3.0 2.5 2.5	0.616 <i>0.153</i>	! !
<i>022019+045226#</i>	-0.51	022016+045526 022048+044728	022023.9+045045 022033.0+045149 022046.6+044912	5.1 5.7 1.8	0.417 <i>0.300</i> 0.395	<i>022019+045226</i> 022101+044616	3.0 3.1		!! !
<i>023950+050042</i>	-1.27	024000+050742*	024007.6+050543	3.0	<i>0.220</i>	<i>023950+050042</i> 023959+050350	5.5 2.0	 0.678	!!
<i>024309+045643#</i> (024322+045802)	-0.60 -0.77	024322+045642	024316.1+045916 024300.7+045916	2.5 6.0	0.088 0.582	<i>024309+045643</i> <i>024322+045802</i>	2.0 1.5	0.533 <i>0.014</i>	!!! Pl

- Galaxy clusters optical catalog from AMF on SDSS DR6 (Szabo et al. 2011): $r < 22.7^m$, $i < 22.2^m$ и $0.05 < z_{sp} < 0.78$.

В интервале RAJ 57° – 120° скоплений практически нет из-за отсутствия информации в каталогах скоплений, так как эта область не перекрывается обзорами SDSS, DES и др. В таблице 1 это диапазон прямых восхождений $3^h < RA < 8^h$. Следует также отметить, что по имеющимся каталогам скоплений галактик мы можем сравнивать расположение пятен на картах Planck, для которых выявлен эффект СЗ, с положением скоплений только в диапазоне красных смещений $0.01 < z \lesssim 0.9$.

Анализируя данные, приведенные в таблице 1, можно отметить следующее. Вблизи практически всех пятен, являющихся потенциальными кандидатами в объекты СЗ независимо от степени уверенности, располагаются скопления галактик или источники RCR-, NVSS-каталогов. В большинстве случаев присутствуют одновременно и скопления, и радиосточники. Исключение составляют только четыре пятна, вблизи которых не обнаружены ни скопления галактик, ни радиосточники. Два из них, 035326+050130 и 040721+044327, располагаются в области неполного покрытия каталогов скоплений обзором SDSS, так что вопрос о присутствии скоплений вблизи них остается открытым. Два других, 135202+044339 и 135209+042900, удалены от RCR-источника 135137+043542 больше чем на $7'$.

Часто вблизи пятен с подозрением на эффект СЗ располагаются несколько скоплений, причем как с близкими по величине красными смещениями, так и с отличающимися в несколько раз. Так, красное смещение одного из скоплений вблизи источника J125554+045339 составляет 0.282, другого — 0.110. Скопление J151056.3+045358, удаленное от источников J151058+045342 и J151054+045416 на расстояние менее $1'$, имеет красное смещение 0.399, другое ближайшее скопление, J151052.2+045203, — 0.082.

Есть еще и такой вариант наложения на луч зрения, когда далекий радиосточник и более близкое

скопление располагаются на одном пятне:

- NVSS J022101 + 044616 ($z_{sp} = 0.682$)
и J022101 + 044616 ($z_{ph} = 0.395$);
- RCR J093628 + 043641 ($z_{ph} = 0.520$)
и J093617.9 + 043555 ($z_{sp} = 0.074$);
- RCR J105929 + 045524
и J105941.0 + 045604 ($z_{sp} = 0.036$);
- RCR J105951 + 045352
и J105948.4 + 045107 ($z_{ph} = 0.511$);
- RCR J111048 + 045608 ($z_{sp} = 2.206$)
и J111054.3 + 045613 ($z_{sp} = 0.031$);
- RCR J111311 + 045511 ($z_{sp} = 0.604$)
и J111312.8 + 045131 ($z_{sp} = 0.109$);
- RCR J113059 + 045438
и J113109.0 + 045705 ($z_{sp} = 0.086$);
- RCR J121148 + 051125 ($z_{sp} = 1.509$)
и J121135.5 + 050912 ($z_{sp} = 0.078$);
- RCR J133920 + 050159 ($z_{sp} = 1.358$)
и J133942.5 + 050317 ($z_{ph} = 0.468$),
- RCR J143702 + 050615 ($z_{sp} = 0.758$)
и J143652.0 + 050504 ($z_{ph} = 0.101$),
- RCR J145329 + 050131 ($z_{ph} = 1.9$)
и J145311.3 + 050813 ($z_{sp} = 0.095$);
- RCR J163832 + 044956 ($z_{sp} = 1.272$)
и J163830.9 + 044627 ($z_{ph} = 0.529$).

Особый интерес представляют радиосточники RCR- и NVSS-каталогов, красные смещения которых совпадают по величине с красными смещениями скоплений, расположенных в непосредственной близости от них (в пределах размера скопления, приведенного в каталоге), что свидетельствует о их принадлежности к этим скоплени-

ям. Это источники:

RCR J020638 + 044808, NVSS J020945 + 045251,
 RCR J024322 + 045802 (P1),
 RCR J091432 + 045537,
 RCR J091924 + 051132, NVSS J092229 + 044941,
 RCR J095100 + 051025,
 NVSS J101620 + 044919 (P1),
 RCR J110423 + 044941 (P1),
 NVSS J111024 + 044945 (P1),
 NVSS J111239 + 050256, RCR J122337 + 045208,
 NVSS J123545 + 045920, NVSS J125553 + 045333,
 NVSS J133140 + 045347,
 NVSS J142732 + 044917 (P1),
 NVSS J145555 + 044126, RCR J151058 + 045342,
 NVSS J151137 + 045200, NVSS J151906 + 044616,
 NVSS J152134 + 050744 (P1),
 NVSS J152416 + 045116,
 RCR J155342 + 044245, RCR J155906 + 050200.

Практически все RCR-источники из этого списка имеют крутые или ультракрутые спектры. «Горячие» пятна на высокочастотных картах вблизи шести радиоисточников отождествляются с объектами каталога Planck, излучение которых на высоких частотах может накладываться на эффект Сюняева–Зельдовича.

Обнаружение пятен, удовлетворяющих условиям эффекта СЗ, вблизи этих источников может служить подтверждением проявления эффекта и его связи со скоплениями. Только вблизи четырех RCR-источников из десяти поведение пятен соответствует наибольшей степени надежности эффекта («!!!» в таблице 1). Однако мы считаем, что связь RCR-радиоисточников со скоплениями вблизи остальных шести объектов Сюняева–Зельдовича позволяет нам говорить о надежности проявления эффекта и вблизи этих источников, несмотря на слабость пятен¹⁰. Отсюда следует, что даже проявления эффекта СЗ с невысокой степенью надежности не стоит исключать из рассмотрения при дальнейших поисках скоплений, поскольку только тщательный анализ карт может

¹⁰Исследуемые нами пятна на картах Planck в большинстве своем по амплитуде не превышают 4σ .

существенно увеличить количество объектов с эффектом Сюняева–Зельдовича.

Поскольку практически все радиоисточники каталога RCR по светимости можно отнести к мощным источникам FR II-типа, они могут быть реперами более далеких скоплений. В качестве примера можно привести RCR-радиоисточник J020651+044828, родительская галактика которого является слабым оптическим объектом¹¹ и, вероятно, имеет красное смещение $z > 1$. Далее можно отметить аналогичные случаи¹²:

RCR J022019 + 045226,
 RCR J024939 + 044028 ($z_{sp} = 2.013$),
 NVSS J034248 + 051028, NVSS J040637 + 045040,
 NVSS J041244 + 050457, RCR J045151 + 050134,
 RCR J050709 + 045520, RCR J051343 + 045854,
 RCR J051909 + 050520, NVSS J051957 + 051617,
 RCR J092446 + 050805,
 RCR J114013 + 045316 ($z_{sp} = 1.715$),
 RCR J115017 + 045601, RCR J144610 + 045031,
 RCR J151855 + 045114, RCR J153032 + 045050.

На рис. 1 представлены отношения T/σ амплитуд пятен T , являющихся потенциальными объектами СЗ, к величине среднеквадратичного шума σ на площадках, где обнаружены эти пятна, в зависимости от частоты. Наличие положительного сигнала на частоте 217 Гц не исключает присутствия СЗ-эффекта, который, однако, экранируется точечным источником.

Из графиков, приведенных на рис. 1 следует, что в большинстве своем мы имеем дело с пятнами, сигнал от которых лежит ниже порога чувствительности обзора ($|T/\sigma| < 4$). Несмотря на это, положение пятен, отобранных в качестве кандидатов в СЗ-объекты, достаточно стабильно на частотных картах Planck, особенно на частотах более 353 ГГц, где неопределенность в положении пятна составляет менее 2'. Чем ярче пятна, тем неопределенность меньше. Для пятен, которые отождествлены с источниками каталога Planck, $T/\sigma > 4$, а позиционная неопределенность меньше 1'.

¹¹В полосе z ее звездная величина составляет $m_z = 23.2$, в других оптических полосах она не наблюдается (данные из NOAO Legacy Survey).

¹²Те источники, для которых не приведены z , являются слабыми оптическими объектами, и в некоторых случаях оптический объект не обнаруживается.

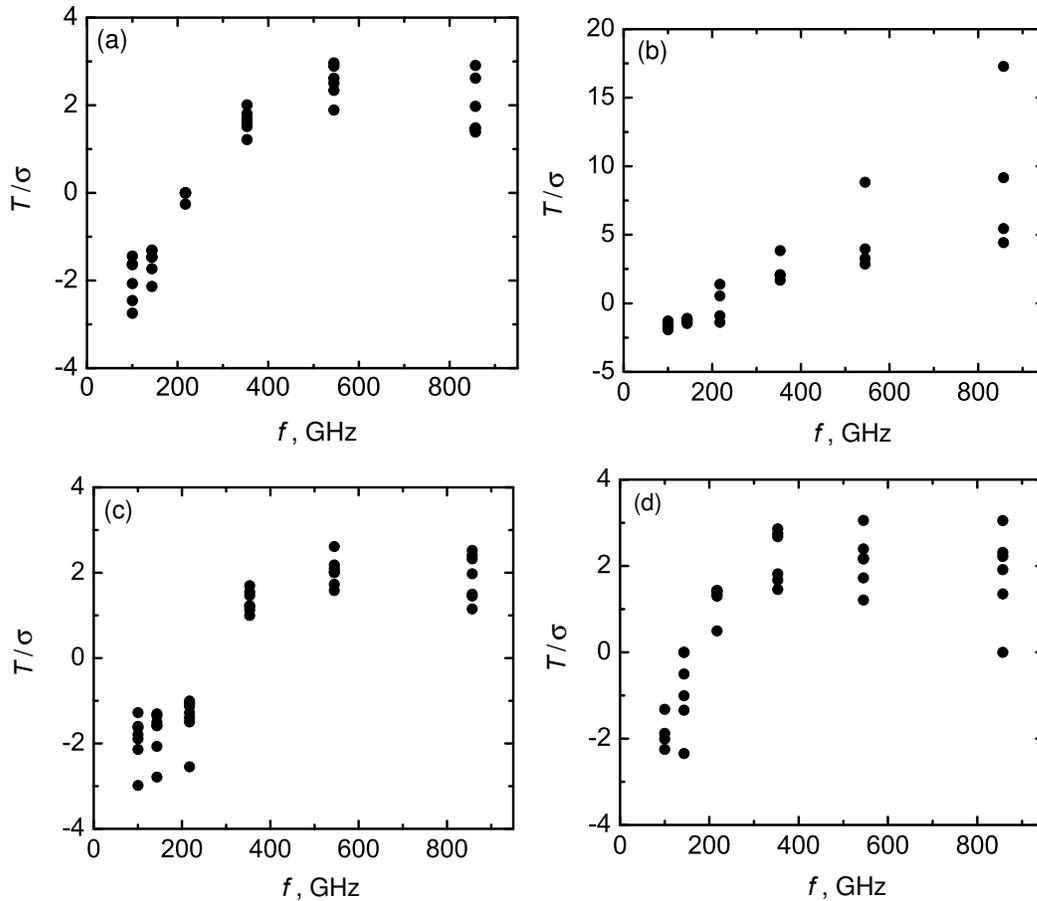


Рис. 1. Отношения амплитуд пятен с возможным эффектом Сюняева–Зельдовича на картах Planck к величине среднеквадратичного шума на площадках, где обнаружены эти пятна, T/σ , в зависимости от частоты. На панели (a) — для пятен, полностью удовлетворяющих условиям СЗ, в частности, отсутствие как положительного, так и отрицательного сигнала на частоте 217 ГГц, и не отождествленных с источниками из каталога Planck, на панели (b) — для пятен, которые также удовлетворяют условиям СЗ, но отождествлены с источниками из каталога Planck на частотах 353, 545, 857 ГГц или на одной из них. На панели (c) — для пятен, которые на частоте 217 ГГц имеют отрицательную амплитуду, на панели (d) — для пятен, имеющих положительный сигнал на частоте 217 ГГц.

Поведение отношения T/σ для пятен, связанных с объектами каталога Planck, несколько отличается от поведения отношения T/σ для пятен, вблизи которых такие объекты не обнаружены. Для первых характерен более крутой подъем T/σ на высоких частотах (рис. 1a, 1b). Для пятен, не совпадающих с источниками каталога Planck, отношения T/σ на частоте 857 ГГц превышают величину T/σ на частоте 545 ГГц не более чем на 20%, а в ряде случаев оказываются существенно меньше него. Для пятен, совпадающих с объектами каталога Planck, зависимость T/σ в высокочастотной области имеет более крутой рост, а отношение $(T/\sigma)_{857}/(T/\sigma)_{545}$ лежит в диапазоне 1.5–2.5 (рис. 1b). Были найдены еще несколько потенциальных объектов с СЗ-эффектом с таким же градиентом T/σ на высоких частотах: вблизи источников J103435+045623, J133218+044819, J113914+044330 и J144806+045106. Величины

отношения $(T/\sigma)_{857}/(T/\sigma)_{545}$ для них составляют 1.6–2.6, а $(T/\sigma)_{857} > 3$.

Список источников, заподозренных в наличие эффекта СЗ, можно разделить еще на два класса: те, что имеют положительные и те, что имеют отрицательные амплитуды пятен на частоте 217 ГГц. На графиках, приведенных на рис. 1c, 1d, видно, что у первых частотные зависимости T/σ имеют более крутой подъем в диапазоне 100–217 ГГц и ближе к зависимостям, наблюдаемым у пятен с «нулевой» амплитудой на частоте 217 ГГц. У пятен с отрицательными амплитудами на частоте 217 ГГц зависимость T/σ в области 100–217 ГГц более пологая.

На рис. 2–6 приведены те изображения областей $30' \times 30'$ на частотных картах Planck вокруг радиоисточников RCR-каталога из нашего списка, которые имеют топологию сигнала, ожидаемую при наличии СЗ-эффекта. Изображения областей

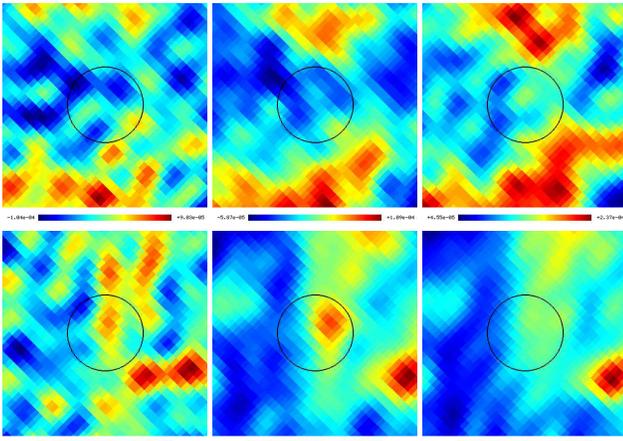


Рис. 2. Изображения области размером $30' \times 30'$ вокруг радиосточника 110935+045604 из RCR-каталога на картах космической миссии Planck на частотах 100, 143, 217, 353, 545, 857 ГГц (слева направо и сверху вниз).

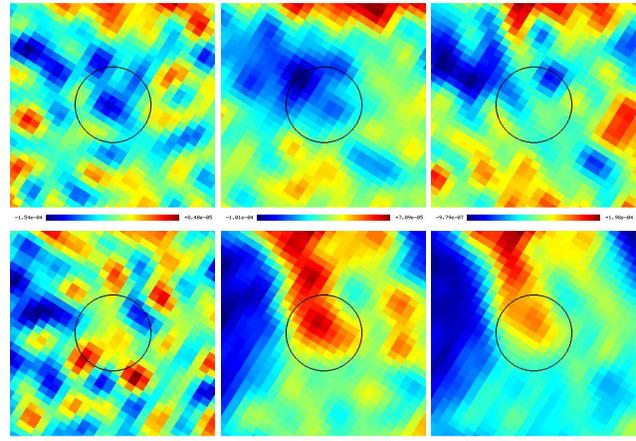


Рис. 4. То же, что на рис. 2, в окрестности радиосточника 155743+045708.

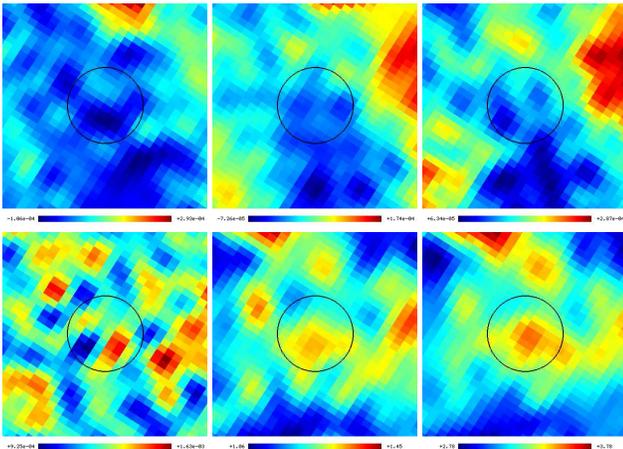


Рис. 3. То же, что на рис. 2, в окрестности радиосточника 155021+050630.

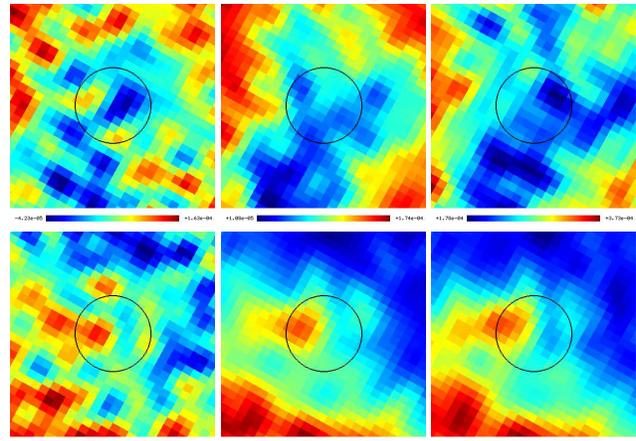


Рис. 5. То же, что на рис. 2, в окрестности радиосточника 164616+044559.

$30' \times 30'$ для всех RCR-объектов, приведенных в таблице 1, даны на сайте <http://www.sao.ru/hq/len/Cluster/>.

На рис. 6 показаны изображения областей вокруг радиосточника J110423+044941, положение которого совпадает с источником PCCS2 G249.34+56.10 каталога Planck на частоте 857 ГГц. Всего в нашем списке имеется восемь объектов из каталога Planck¹³, которые совпадают с потенциальными СЗ-объектами, два из них удалены от RCR-источников на расстояние свыше $7'$. Поведение амплитуд пятен около этих источников удовлетворяет условиям эффекта СЗ, однако на высоких частотах (545 и 857 ГГц) источники Planck могут экранировать эффект СЗ.

¹³В таблице 1 они обозначены буквами P1 (колонка (11)).

Были построены гистограммы распределений спектральных индексов на частотах 1.4 и 3.94 ГГц тех RCR-источников, вблизи которых обнаружены пятна с возможным эффектом СЗ. На рис. 7 они показаны сплошными черными (Sp.Ind._{1.4}) и штриховыми красными (Sp.Ind._{3.94}) линиями соответственно. На панели (а) приведены гистограммы спектральных индексов всех источников из таблицы 1, расстояния от которых до пятен с эффектом СЗ не превышает $7'$ (86 объекта), на панели (б) — только для источников, соседних с пятнами с наибольшей степенью надежности проявления эффекта СЗ (обозначены в колонке (3) значками «!!» и «!!!») (67 объектов). Там же приведены медианные значения распределений на разных частотах. Оказалось, что гистограммы распределений для обеих выборок практически идентичны, так же, как и их медианные значения. На панели (с) рис. 7 приводятся гистограммы спектральных индексов RCR-объектов, вблизи которых пятна с подозре-

нием на эффект СЗ имеют близкие к нулевым амплитуды ($T < 1\sigma$) на частоте 217 ГГц, на панели (d) — отрицательные.

Сравнивая распределения спектральных индексов RCR-источников, приведенные на рис. 7, и их медианные значения, можно констатировать, что больше половины источников, вблизи которых находятся пятна с возможным эффектом СЗ — это источники с крутыми и ультракрутыми спектрами независимо от степени уверенности в эффекте. Медианные значения спектральных индексов на частотах 1.4 и 3.94 ГГц составляют соответственно -0.79 , -0.83 . Практически такие же медианные значения и характер распределений имеют и RCR-объекты, вблизи которых пятна на частоте 217 ГГц имеют «нулевые» амплитуды ($T < 1\sigma$). В нашем списке оказалось семь RCR-объектов, вблизи которых пятна с возможным эффектом СЗ на частоте 217 ГГц имеют положительные амплитуды. Их медианные значения на частотах 1.4 и 3.94 ГГц равны -0.73 и -0.83 соответственно. Что касается источников, у которых пятна на частоте 217 ГГц отрицательны, то в этой выборке преобладают объекты с более крутыми спектрами, чем для всего списка в целом. Медианные значения распределений на 1.4 и 3.94 ГГц составили -0.84 и -0.93 соответственно.

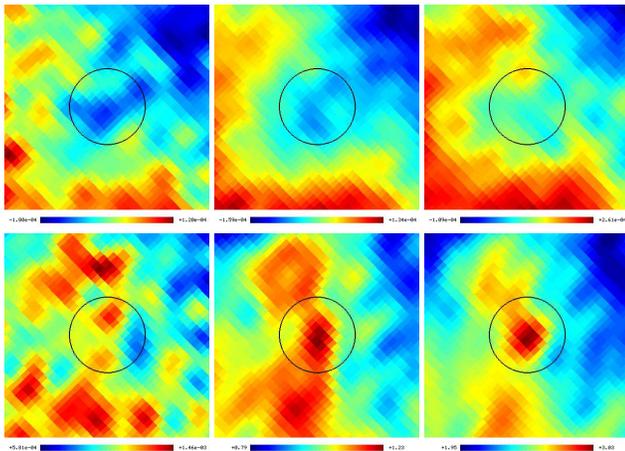


Рис. 6. То же, что на рис. 2, в окрестности радиоисточника 110423+044941.

На рис. 8 представлены гистограммы распределений спектральных индексов RCR-источников, вблизи которых около пятен с возможным эффектом СЗ обнаружены скопления галактик (левая панель) и тех, вблизи которых скопления не обнаружены (правая панель). При построении этих распределений использовались только

RCR-источники, от которых потенциальные пятна с эффектом СЗ удалены не более чем на $7'$.

RCR-объекты, вблизи которых пятна с подозрением на эффект СЗ и скопления галактик находятся в непосредственной близости, имеют более крутые спектры, чем объекты, возле которых скоплений не обнаружены. У первых медианные значения спектральных индексов $Sp.Ind_{3.94}$ и $Sp.Ind_{1.4}$ составляют -0.88 и -0.82 соответственно, у вторых: -0.76 и -0.75 . Следует отметить, что большинство скоплений галактик, расположенных вблизи пятен с возможным эффектом Сюняева–Зельдовича, имеют красное смещение $z \geq 0.1$.

Отметим, что визуальное обследование частотных карт Planck с помощью программного приложения Aladdin позволяет получить дополнительную информацию о взаимном расположении «горячих» пятен и источников NVSS- и RCR-каталогов, а также скоплений галактик. В подавляющем большинстве источники располагаются или внутри пятен ($\Delta l \leq 3'$), или по краю пятна ($3' < \Delta l \leq 5'$). В диапазонах $2^h < RA < 9^h$ и $RA > 16^h$ эти пятна имеют достаточно протяженные размеры. Примером может быть сложная протяженная структура «горячих» пятен на частотах 545 и 857 ГГц, занимающая почти четверть площадки с центром, совпадающим с источником J051909+050520. На частоте 353 ГГц эта структура распадается на более мелкие пятна, вблизи или внутри которых располагаются NVSS-объекты. Эффект распада крупного пятна, обнаруженного на частотных картах 545 и 857 ГГц, на более мелкие на карте 353 ГГц наблюдается также и на площадках, центр которых совпадает с координатами источников J113353+04590 и J162454+04455.

3.3. Оценки плотностей потоков «горячих» пятен на частотах 353, 545 и 857 ГГц и построение двухчастотных спектров

Были проведены оценки плотностей потоков пятен с возможным эффектом СЗ на частотах 353, 545 и 857 ГГц. Пятна на этих частотах в большинстве своем имеют положительную амплитуду. Для оценки плотностей потоков использовалась методика, описанная в работе Verkhodanov et al. (2015a), которая предполагает измерение интегральной яркости пятен на картах Planck с помощью программы SExtractor (Bertin and Arnouts 1996). Полученные яркостные температуры пересчитывались в плотности потоков с помощью калибровочных кривых, связывающих плотности потоков (в Янских) с яркостной температурой микроволнового фона на картах Planck (в градусах Кельвина). В качестве линейных калибровочных

Таблица 2. Двухчастотные спектральные индексы пятен — потенциальных объектов СЗ, — полученные из оценок их плотностей потоков на частотах 353, 545 и 857 ГГц. В столбце (1) приведены координаты источников RCR-каталога, вблизи которых обнаружены эти объекты, в столбце (2) — координаты пятна с возможным эффектом СЗ. Курсивом обозначены координаты источников, расстояние от которых до центров пятен не превышает 7', обычным шрифтом — более 7'. В столбцах (3), (4), (5) даны величины $Sp.Ind_{.353-545}$, $Sp.Ind_{.545-857}$ и $Sp.Ind_{.353-857}$ с ошибками оценок, в колонках (6) и (7) — отношения величин спектральных индексов $Sp.Ind_{.353-545}/Sp.Ind_{.353-857}$ и $Sp.Ind_{.545-857}/Sp.Ind_{.353-857}$ соответственно

RCR name	SZ Dec RA	$Sp.Ind_{.353-545}$ $\pm err$	$Sp.Ind_{.545-857}$ $\pm err$	$Sp.Ind_{.353-857}$ $\pm err$	$(Sp.Ind_{.353-545})/$ $(Sp.Ind_{.353-857})$	$(Sp.Ind_{.545-857})/$ $(Sp.Ind_{.357-857})$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
<i>020651 + 044828</i>	020650 + 045018	2.41 ± 0.23	2.56 ± 0.58	2.49 ± 0.19	0.97	1.03
<i>020912 + 050051</i>	020904 + 050143	-1.10 ± 0.36	2.66 ± 0.16	0.85 ± 0.13	-1.30	3.12
	020845 + 045324	4.43 ± 0.01	1.89 ± 0.56	3.13 ± 0.29	1.41	0.60
<i>020931 + 045535</i>	020936 + 045358	0.58 ± 1.03	2.12 ± 1.34	1.37 ± 0.19	0.42	1.53
<i>022019 + 045226</i>	022016 + 045526	0.25 ± 0.69	1.03 ± 1.10	0.66 ± 0.23	0.39	1.56
	022048 + 044728	-2.15 ± 0.07				
<i>023950 + 050042</i>	024000 + 050742	1.31 ± 0.66	3.14 ± 0.16	2.25 ± 0.41	0.58	1.38
<i>024309 + 045643</i>	024322 + 045642	3.15 ± 0.63	2.38 ± 0.11	2.75 ± 0.25	1.15	0.86
<i>024939 + 044028</i>	024936 + 044131	1.48	3.28	2.41	0.61	1.36
<i>030357 + 050240</i>	030412 + 050008	3.79	0.91	2.31	1.64	0.39
	030352 + 050926	2.34 ± 1.03	2.34 ± 1.24	2.34 ± 0.13	1.00	1
<i>030733 + 045304</i>	030720 + 045030	3.77 ± 2.36	1.78 ± 1.07	2.75 ± 1.69	1.37	0.64
<i>033959 + 050058</i>	033943 + 050125	3.82 ± 0.50	2.86 ± 0.29	3.33 ± 0.09	1.15	0.86
	034008 + 050825	3.63 ± 0.56	2.26 ± 0.01	2.93 ± 0.27	1.23	0.77
034151 + 045925	034239 + 051051	4.68 ± 4.21	3.29 ± 1.41	3.98 ± 1.32	1.18	0.82
034329 + 045750	034246 + 050910	4.35 ± 1.32	2.47 ± 0.42	3.24 ± 0.66	1.35	0.76
034931 + 050042	035013 + 045053	2.67 ± 0.34	2.17 ± 0.01	2.42 ± 0.17	1.10	0.89
<i>035303 + 050431</i>	035309 + 050000	-1.70				
	035236 + 050130	2.17 ± 0.83	3.09 ± 0.01	2.64 ± 0.41	0.82	1.16
040626 + 044753	040655 + 045034	3.27 ± 0.26	2.84 ± 0.36	3.05 ± 0.06	1.07	0.93
	040721 + 044337	2.27 ± 0.52	2.37 ± 0.08	2.32 ± 0.30	0.98	1.02

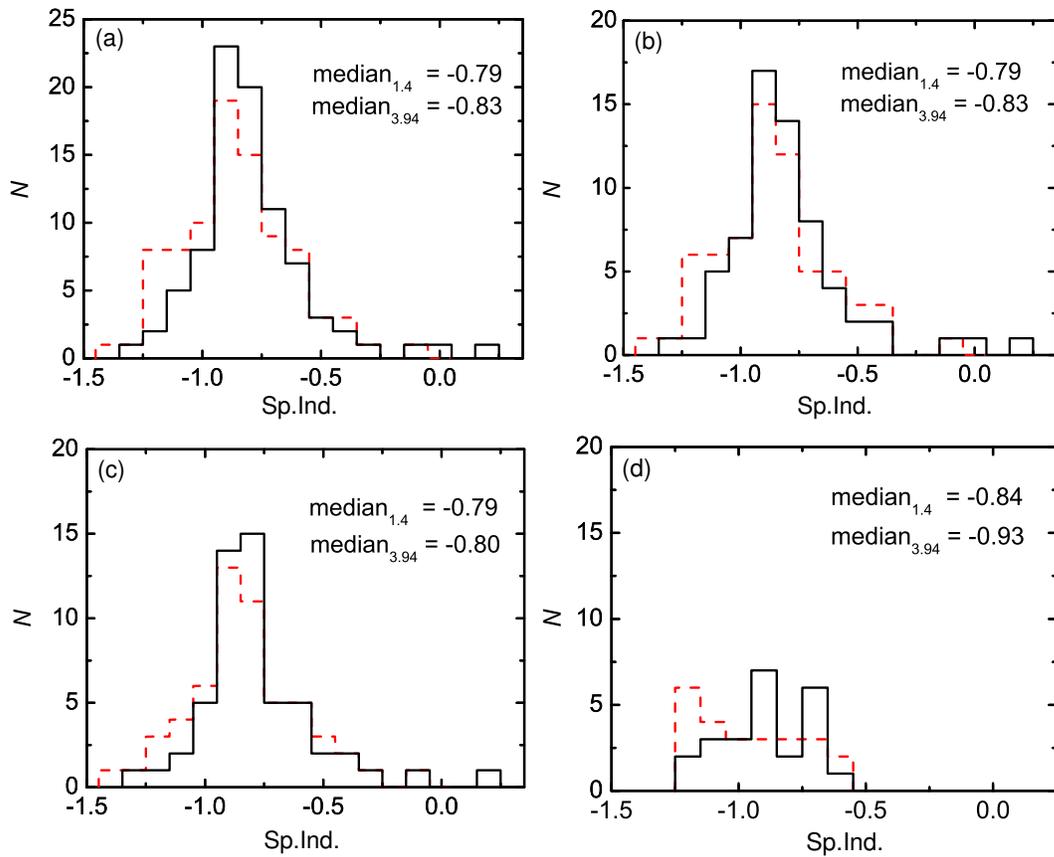


Рис. 7. Распределения спектральных индексов RCR-радиоисточников, вблизи которых обнаружены пятна на картах Планк с возможным эффектом Сюняева–Зельдовича. Сплошной черной линией обозначены распределения спектральных индексов на частоте 1.4 ГГц, красной штриховой — на частоте 3.94 ГГц. Приведены медианные значения распределений на разных частотах. На панели (a) изображены гистограммы спектральных индексов RCR-источников, расстояние от которых до пятен с эффектом Сюняева–Зельдовича не превышает $7'$ (выделены курсивом в таблице 1), на панели (b) — только тех, вблизи которых располагаются пятна с наибольшей степенью надежности проявления СЗ-эффекта (обозначены в колонке (3) значками «!!» и «!!!»). На панели (c) приводятся гистограммы спектральных индексов RCR-объектов, вблизи которых пятна с подозрением на эффект СЗ имеют близкие к нулевым ($T < 1\sigma$) амплитуды на частоте 217 ГГц, на панели (d) — имеющих отрицательные значения амплитуд на этой частоте.

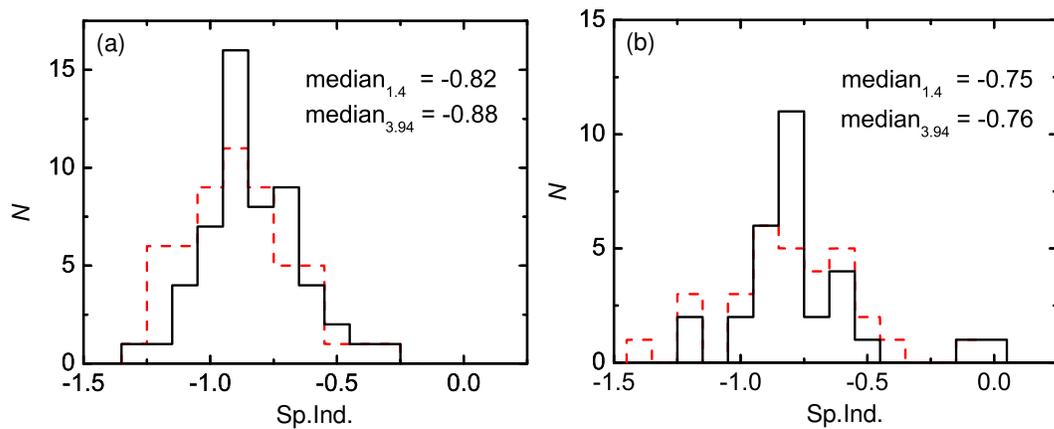


Рис. 8. Гистограммы распределений спектральных индексов тех RCR-источников, вблизи которых около пятен с возможным эффектом СЗ обнаружены скопления галактик (a), и тех, вблизи которых скопления не обнаружены (b). Сплошной черной линией обозначены распределения спектральных индексов на частоте 1.4 ГГц, красной штриховой — на частоте 3.94 ГГц. Приведены медианные значения распределений на разных частотах.

кривых использовались как приведенные в работе Verkhodanov et al. (2015a), так и новые, уточненные, полученные в работе Sotnikova et al. (2019) по новым калибровочным источникам. Для уменьшения влияния «нулевого» уровня (чувствительного к изменению размеров площадок) на величину плотностей потоков оценки проводились по площадкам размерами $30' \times 30'$ и $1^\circ \times 1^\circ$.

Используя полученные величины плотностей потоков «горячих» пятен на частотах 353, 545 и 857 ГГц, мы оценили двухчастотные спектральные индексы пятен на высоких частотах: $\text{Sp.Ind.}_{353-545}$, $\text{Sp.Ind.}_{545-857}$ и $\text{Sp.Ind.}_{353-857}$. Их величины с ошибками оценок, полученными при использовании площадок разных размеров, представлены в таблице 2 (колонки (3), (4), (5))¹⁴. В колонке (1) таблицы даны координаты источников RCR-каталога, с которыми совпадают центры площадок $30' \times 30'$ на частотных картах Planck. Курсивом обозначены координаты источников, расстояние от которых до потенциальных пятен с эффектом СЗ не превышает $7'$, в колонке (2) — координаты центра пятна с возможным эффектом СЗ, в колонках (6) и (7) — отношения величин спектральных индексов $\text{Sp.Ind.}_{353-545}/\text{Sp.Ind.}_{353-857}$ и $\text{Sp.Ind.}_{545-857}/\text{Sp.Ind.}_{353-857}$ соответственно.

На рис. 9 представлены гистограммы распределений спектральных индексов $\text{Sp.Ind.}_{353-545}$ (слева) и $\text{Sp.Ind.}_{545-857}$ (справа), полученные по оценкам плотностей потоков пятен с возможным эффектом СЗ. На верхних панелях приведены распределения для всего списка пятен, на центральных — для пятен, вблизи которых располагаются скопления, на нижних — для пятен, вблизи которых скопления не обнаружены. Числами на панелях обозначены медианные значения распределений. При построении распределений использовались спектральные индексы, полученные для всех пятен с возможным эффектом СЗ, обнаруженных на площадках частотных карт Planck, центры которых совпадали с координатами RCR-объектов независимо от расстояний от пятна до центра площадки.

Характер распределений спектральных индексов $\text{Sp.Ind.}_{353-545}$ для пятен, вблизи которых обнаружены скопления галактик, несколько отличается от распределения $\text{Sp.Ind.}_{353-545}$ для пятен, вблизи которых располагаются скопления, и повторяет характер распределений, полученный для всего списка пятен. Общим для всех распределений является наличие спектральных индексов $\text{Sp.Ind.}_{353-545} < 0$, то есть во всех выборках присутствуют пятна, у которых плотность потока на

частоте 545 ГГц ниже по сравнению с плотностью потока на частоте 353 ГГц.

Кроме того, среди пятен, вблизи которых не обнаружены скопления, наблюдается избыток пятен с очень крутыми спектрами $\text{Sp.Ind.}_{353-545} > 3$, по сравнению с пятнами, где присутствуют скопления галактик. Такой характер спектра свидетельствует о наличии в этой выборке большого числа «пылевых» пятен. Характер распределения $\text{Sp.Ind.}_{353-545}$ для пятен, вблизи которых не обнаружены скопления, в положительной области близок к распределению, приведенному в работе Ade et al. (2014c). Медианное значение последнего составляет порядка 2.5. Если вписать гауссиану в полученное нами распределение, значение абсциссы максимума также составит 2.5. Для пятен, вблизи которых обнаружены скопления, мы наблюдаем менее крутые спектры, чем приведенные в работе Ade et al. (2014c). Медианное значение распределения $\text{Sp.Ind.}_{353-545} = 1.5$, а абсцисса максимума вписанной гауссианы равна 1.8, что почти в полтора раза меньше оценки, приведенной в работе Ade et al. (2014c).

Распределения двухчастотных спектральных индексов $\text{Sp.Ind.}_{545-857}$ мало различаются для пятен, вблизи которых располагаются скопления галактик, и пятен, вблизи которых скопления не обнаружены. Распределения и их медианные значения близки к полученным в работе Ade et al. (2014c). Это свидетельствует о том, что часть пятен — это проявление источников с пылевой составляющей, которые накладываются на эффект СЗ. Это подозрение особенно возрастает для пятен, у которых значения $\text{Sp.Ind.}_{353-545} < 0$ и $\text{Sp.Ind.}_{545-857} > 1$. Интересно, что доля таких пятен больше среди тех, что не связаны со скоплениями. Последние могут экранироваться пылевыми областями. Возрастающий спектр на высоких частотах может также указывать на имитацию эффекта СЗ, обусловленную дополнительным компонентом излучения родительской галактики.

На рис. 10 приведены гистограммы распределений спектральных индексов $\text{Sp.Ind.}_{353-545}$ (слева) и $\text{Sp.Ind.}_{545-857}$ (справа) для пятен с возможным эффектом СЗ, имеющих близкие к нулевым значения амплитуд ($T < 1\sigma$) на частоте 217 ГГц (верхние панели), отрицательные амплитуды (центральные панели) и положительные амплитуды (нижние панели). Числами обозначены медианные значения распределений.

Характер распределений индексов $\text{Sp.Ind.}_{353-545}$, $\text{Sp.Ind.}_{545-857}$ пятен, имеющих близкие к нулевым амплитуды на частоте 217 ГГц, повторяет распределения для всего списка пятен (рис. 9, верхние панели) и близок к распределениям спектральных

¹⁴Таблица целиком доступна по адресу: http://www.sao.ru/hq/len/Cluster/Tab1_2/

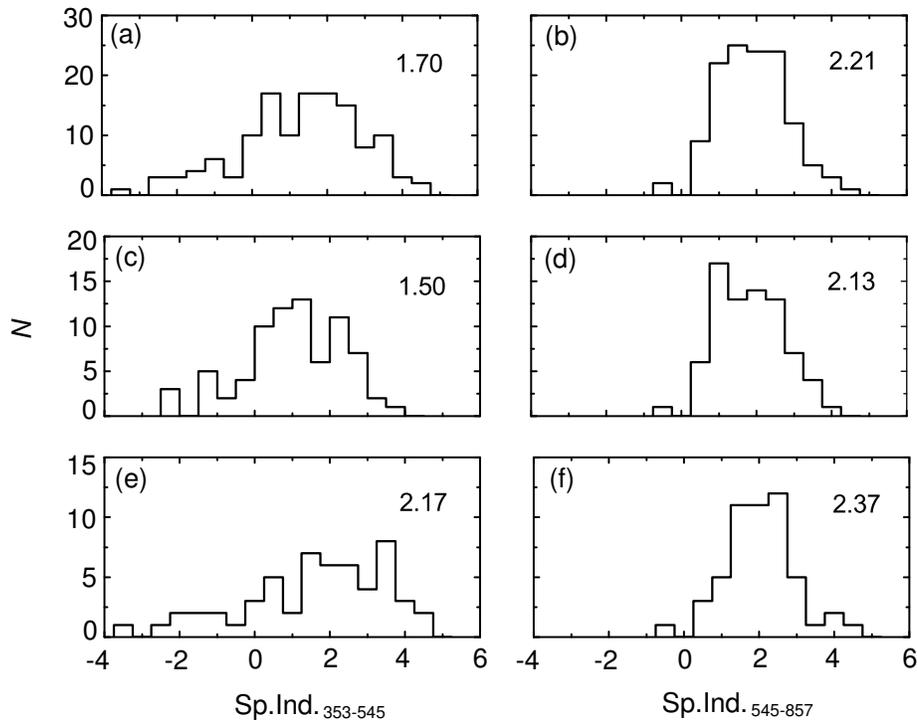


Рис. 9. Гистограммы распределений спектральных индексов $\text{Sp.Ind.}_{353-545}$ (слева) и $\text{Sp.Ind.}_{545-857}$ (справа), полученные из оценок плотностей потоков пятен с возможным эффектом СЗ. На верхних панелях приведены распределения, полученные для всего списка пятен, на центральных — для пятен, вблизи которых располагаются скопления галактик, на нижних — для пятен, вблизи которых скопления не обнаружены. Числами на панелях обозначены медианные значения распределений.

индексов пятен с отрицательными амплитудами. Что касается распределений спектральных индексов пятен, имеющих положительные амплитуды на частоте 217 ГГц, то практически все они лежат в положительных областях, причем $\text{Sp.Ind.}_{353-545}$ и $\text{Sp.Ind.}_{545-857} > 2$. Это может свидетельствовать о том, что практически все они являются пылевыми источниками.

О пылевом характере спектра пятна может свидетельствовать и отношение спектральных индексов (колонки (6) и (7) таблицы 2). Чем больше отношение $\text{Sp.Ind.}_{545-857}/\text{Sp.Ind.}_{353-857}$ превышает 1, а $\text{Sp.Ind.}_{353-545}/\text{Sp.Ind.}_{353-857}$ для того же пятна меньше 1, тем больше вероятность того, что мы имеем дело с пылевыми пятнами.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы изучали карты миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов космической миссии Planck вблизи объектов RCR-каталога. В предположении, что активности галактического ядра предшествует слияние галактик, а значит, радиоисточники должны располагаться в области повышенной плотности материи, проведен поиск эффекта

Сюняева–Зельдовича в направлении на радиогалактики. Для наблюдательного проявления эффекта на уровне чувствительности обсерватории Planck, который не зависит от красного смещения, но зависит от массы скопления, необходимы объекты с массами более $10^{14} - 10^{15} M_{\odot}$, и присутствие эффекта может об этом свидетельствовать. Следует отметить, что, хотя радиисточник часто отождествляется с центральной галактикой скопления, он может находиться и на окраине скопления, где происходит слияние галактик. Из приведенного в таблице 1 списка источников (столбец (7)) мы видим, что порядка 270 радиоисточников попадают в области размером около 1.5 диаграммы направленности антенны Planck, где с разной долей уверенности обнаруживается эффект СЗ.

Оказалось, что более половины RCR-источников, вблизи которых были найдены потенциальные кандидаты в объекты СЗ, — это источники с крутыми и ультракрутыми спектрами. Вблизи большинства пятен — возможных кандидатов в объекты СЗ — располагаются скопления с красным смещением более 0.10. У 24 радиоисточников RCR- и NVSS-каталогов красные смещения совпадают по величине с красными смещениями скоплений, расположенных в непосредственной близости от них, что свидетельствует об их принадлежности

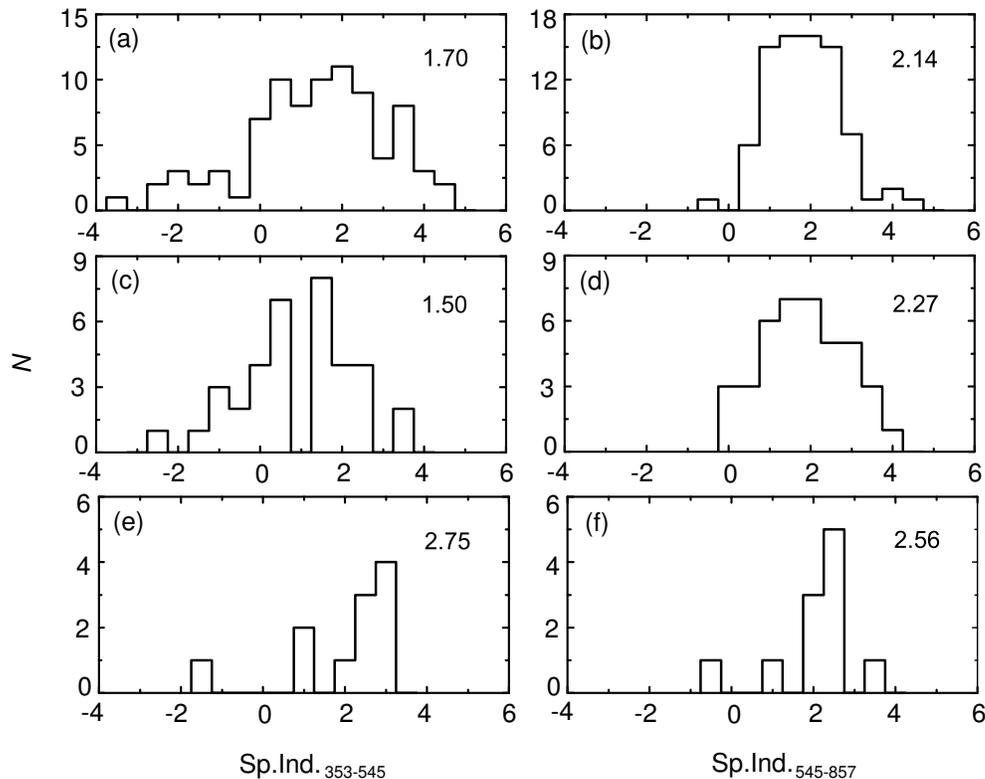


Рис. 10. Гистограммы распределений спектральных индексов $\text{Sp.Ind.}_{353-545}$ (слева) и $\text{Sp.Ind.}_{545-857}$ (справа), полученные из оценок плотностей потоков пятен с возможным эффектом СЗ. На верхних панелях приведены распределения, полученные для пятен, имеющих близкие к нулевым ($T < 1\sigma$) значения амплитуд пятен на частоте 217 ГГц, на центральных — отрицательные амплитуды пятен на этой частоте, на нижних — положительные амплитуды пятен на 217 ГГц. Числами на панелях обозначены медианные значения распределений.

этим скоплениям. Обнаружение пятен, удовлетворяющих условиям эффекта СЗ, вблизи этих источников может служить подтверждением проявления эффекта и его связи со скоплениями. Учитывая, что обследуемые пятна вблизи RCR-источников в большинстве своем по амплитуде не превышают 4σ , можно утверждать, что тщательный анализ карт Planck может существенно увеличить количество объектов с эффектом Сюняева–Зельдовича.

Всего в полосе обзора «Cold» было отобрано 135 кандидатов в объекты с эффектом Сюняева–Зельдовича. Из них 86 удалены от источников RCR-каталога менее чем на $7'$, что составляет порядка 10% от всего списка объектов RCR-каталога. Из 86 кандидатов подтверждение как автоматизированным способом, описанным в работе Verkhodanov et al. (2018), так и визуально получено для 41 объекта (примерно 5%). Если учитывать наиболее надежные кандидаты в объекты Сюняева–Зельдовича, а также те, вблизи которых радиоисточники RCR принадлежат близлежащим скоплениям независимо от степени надежности проявления эффекта СЗ, их насчитывается порядка 3% (25 объектов).

RCR-объекты, вблизи которых пятна с подозрением на эффект СЗ и скопления галактик находятся в непосредственной близости, могут иметь более крутые спектры, чем объекты, вблизи которых скопления не обнаружены. Так, медианные значения распределений спектральных индексов на частоте 3.94 ГГц составляют для них соответственно -0.88 и -0.76 .

Было обнаружено, что вблизи пятен, имеющих топологию эффекта СЗ, могут располагаться скопления галактик с отличающимися красными смещениями или радиоисточник (чаще более далекий) и скопление с различными z . Можно предположить, что при попадании на луч зрения нескольких скоплений галактик возможно ослабление или замывание эффекта СЗ.

Часть пятен в области радиоисточников может быть связана с пылевой компонентой нашей Галактики, которая накладывается на область с СЗ-эффектом. Это подозрение особенно возрастает для «горячих» пятен в высокочастотном диапазоне, у которых двухчастотные спектральные индексы $\text{Sp.Ind.}_{353-545}$ и $\text{Sp.Ind.}_{545-857} > 2$. Относительная доля таких пятен больше среди тех, которые не связаны со скоплениями галактик,

что может свидетельствовать об экранировании их пылевыми структурами. Возрастающий спектр на высоких частотах может быть связан и с наложением на эффект СЗ дополнительного излучения от родительской галактики.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны Европейскому космическому агентству ESA за открытый доступ к результатам наблюдений и обработки данных в Planck Legacy Archive. При построении радиоспектров использовалась база данных радиоастрономических каталогов CATS (Verkhodanov et al. 2005b; 2009). В работе применялись система обработки радиоастрономических данных FADPS (Verkhodanov 1997, Verkhodanov et al. 1993) и пакет GLESP (Verkhodanov et al. 2005) для анализа протяженного излучения на сфере.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), *Astron. and Astrophys.* **571**, A1 (2014).
2. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), *Astron. and Astrophys.* **571**, A20 (2014).
3. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), *Astron. and Astrophys.* **571**, A28 (2014).
4. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), *Astron. and Astrophys.* **582**, A28 (2015).
5. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), *Astron. and Astrophys.* **594**, A26 (2016).
6. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), *Astron. and Astrophys.* **594**, A27 (2016).
7. Y. Akrami et al. (Planck Collab.), arXiv:1807.06205 (2018).
8. P. Banerjee, T. Szabo, E. Pierpaoli, et al., *New Astron.* **58**, 61 (2018).
9. E. Bertin and S. Arnouts, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **117**, 393 (1996).
10. T. Boch, P. Fernique, *ASP Conf. Ser.* **485**, 277 (2014).
11. F. Bonnarel, P. Fernique, O. Bienayme, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **143**, 33 (2000).
12. J. Delabrouille, M. Betoule, J.-B. Melin, et al., *Astron. and Astrophys.* **553**, A96 (2013).
13. A. G. Doroshkevich, O. B. Verkhodanov, P. D. Naselsky, et al., *Intern. J. Mod. Phys. D* **20**, 1053 (2011).
14. N. Hurley-Walker, J. R. Callingham, P. J. Hancock, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **464**, 1146 (2017).
15. H. T. Intema, P. Jagannathan, K. P. Mooley, D. A. Frail, *Astron. and Astrophys.* **598**, A78 (2017).
16. R. R. Gal, P. A. A. Lopes, R. R. de Carvalho, et al., *Astron. J.* **137**, 2981 (2009).
17. P. C. Gregory, W. K. Scott, K. Douglas, and J. J. Condon, *Astrophys. J. Suppl.* **103**, 427 (1996).
18. L. I. Gurvits, K. I. Kellermann, and S. Frey, *Astron. and Astrophys.* **342**, 378 (1999).
19. A. I. Kopylov, W. M. Goss, Y. N. Parijskij, et al., *Astronomy Letters* **32**, 433 (2006).
20. W. M. Lane, W. D. Cotton, S. van Velzen, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **440**, 327 (2014).
21. P. A. A. Lopes, R. R. de Carvalho, R. R. Gal, et al., *Astron. J.* **128**, 1017 (2004).
22. E. K. Majorova, O. P. Zhelenkova, and A. V. Temirova, *Astrophysical Bulletin* **70**, 33 (2015).
23. F. Ochsenbein, P. Bauer, and J. Marcout, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **143**, 23 (2000).
24. M. Oguri, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **444**, 147 (2014).
25. Y. N. Parijskij, P. Thomasson, A. I. Kopylov, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **439**, 2314 (2014).
26. Yu. N. Pariiskii and D. V. Korolkov, *Itogi Nauki i Tekhniki. Seriya Astronomiia* **31** (1986) [in Russian].
27. Yu. N. Parijskij, N. N. Bursov, N. M. Lipovka, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **87**, 1 (1991).
28. Yu. N. Parijskij, N. N. Bursov, N. M. Lipovka, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **98**, 391 (1993).
29. A. G. Riess, S. Casertano, W. Yuan, et al., *Astrophys. J.* **855**, 136 (2018).
30. E. S. Rykoff, E. Rozo, M. T. Busha, et al., *Astrophys. J.* **785**, 104 (2014).
31. E. S. Rykoff, E. Rozo, D. Hollowood, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **224**, 1 (2016).
32. N. S. Soboleva, E. K. Majorova, O. P. Zhelenkova, et al., *Astrophysical Bulletin* **65**, 42 (2010).
33. Yu. V. Sotnikova, T. V. Mufaharov, E. K. Majorova, et al., *Astrophysical Bulletin* **74**, 348 (2019).
34. R. A. Sunyaev and Y. B. Zeldovich, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **190**, 413 (1980).
35. R. A. Sunyaev and Y. B. Zeldovich, *Comments Astrophysics Space Physics* **4**, 173 (1972).
36. T. Szabo, E. Pierpaoli, F. Dong, et al., *Astrophys. J.* **736**, 21, (2011).
37. E. Tempel, T. Tuvikene, R. Kipper, and N. Libeskind, *Astron. and Astrophys.* **602**, A100 (2017).
38. B. P. Venemans, H. J. A. Röttgering, G. K. Miley, et al., *Astron. and Astrophys.* **461**, 823 (2007).
39. O. V. Verkhodanov, *ASP Conf. Ser.* **125**, 46 (1997).
40. O. V. Verkhodanov and Yu. N. Parijskij, *Radio Galaxies and Cosmology* (Fizmatlit, Moscow, 2009) [in Russian].
41. O. V. Verkhodanov, A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, et al., *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **58**, 40 (2005).
42. O. V. Verkhodanov, B. L. Erukhimov, M. L. Monosov, et al., *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **36**, 132 (1993).
43. O. V. Verkhodanov, E. K. Majorova, O. P. Zhelenkova, et al., *Astrophysical Bulletin* **70**, 156 (2015).
44. O. V. Verkhodanov, E. K. Majorova, O. P. Zhelenkova, et al., *Astronomy Letters*, **41**, 457 (2015).
45. O. V. Verkhodanov, E. K. Majorova, O. P. Zhelenkova, et al., *Astronomy Reports*, **60**, 630 (2016).

46. O. V. Verkhodanov, Ya. V. Naiden, V. N. Chernenkov, and N. V. Verkhodanova, *Astrophysical Bulletin* **69**, 113 (2014).
47. O. V. Verkhodanov, Yu. N. Parijskij, and A. A. Starobinsky, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **58**, 5 (2005).
48. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach, and V. N. Chernenkov, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **58**, 118 (2005b).
49. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach, and V. N. Chernenkov, *Data Science J.* **8**, 34 (2009).
50. O. V. Verkhodanov, N. V. Verkhodanova, O. S. Ulahovich, et al., *Astrophysical Bulletin* **73**, 1 (2018).
51. Z. L. Wen and J. L. Han, *Astrophys. J.* **807**, 178 (2015).
52. Z. L. Wen, J. L. Han, and F. S. Liu, *Astrophys. J. Suppl.* **199**, 34 (2012).
53. Ya. B. Zeldovich and R. A. Sunyaev, *Astrophys. Sp. Sci.* **4**, 301 (1969).
54. O. P. Zhelenkova, E. K. Majorova *Astrophysical Bulletin* **73**, 142 (2018).
55. O. P. Zhelenkova, N. S. Soboleva, E. K. Majorova, and A. V. Temirova, *Astrophysical Bulletin* **68**, 26 (2013).
56. O. P. Zhelenkova, N. S. Soboleva, A. V. Temirova, and N. N. Bursov *Astrophysical Bulletin* **72**, 150 (2017).

Search for Candidate Objects with the Sunyaev–Zeldovich Effect on Planck Maps in the Neighborhood of RCR Catalog Radio Sources

E. K. Majorova, O. V. Verkhodanov, and O. P. Zhelenkova

Millimeter- and submillimeter-wave maps are used to select potential candidate objects with the Sunyaev–Zeldovich effect in the vicinity of RCR (RATAN Cold Refined) radio sources. The properties of “hot” and “cold” spots in the right-ascension interval $2^{\text{h}} \leq \text{RA} \leq 17^{\text{h}}$ and the declination strip $\text{Dec}_{2000} = 4^{\circ}59' \pm 15'$ are studied. In the entire strip a total of 135 candidate objects with the Sunyaev–Zeldovich effect are found. A total of 86 objects are located within $7'$ from RCR catalog sources. The effect shows up most conspicuously in the vicinity of 25 RCR sources. Clusters of galaxies or radio sources are found near the overwhelming majority of spots with the Sunyaev–Zeldovich effect. The distributions of radio spectral indices of the objects and the signal on microwave maps in the direction of radio sources are statistically analyzed. It is shown that when observed at microwave frequencies a number of objects are associated with sources with inverted spectra.

Keywords: *cosmic background radiation*