

УДК 524.827

ПОИСК КАНДИДАТОВ В ОБЪЕКТЫ С ЭФФЕКТОМ СЮНЯЕВА–ЗЕЛЬДОВИЧА В ОКРЕСТНОСТИ РАДИОИСТОЧНИКОВ

© 2018 О. В. Верходанов^{1*}, Н. В. Верходанова¹,
О. С. Улахович², Д. И. Соловьев³, М. Л. Хабибуллина¹

¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

²Приволжский (Казанский) федеральный университет, Казань, 420008 Россия

³Санкт-Петербургский филиал Специальной астрофизической обсерватории РАН, Санкт-Петербург, 196140 Россия

Поступила в редакцию 14 июня 2017 года; принята в печать 19 декабря 2017 года

По данным Вестерборкского обзора неба, проведенного на частоте 325 МГц в диапазоне прямых восхождений $0^{\text{h}} \leq \alpha < 2^{\text{h}}$ и склонений $29^{\circ} < \delta < 78^{\circ}$, и с применением многочастотных карт миссии Planck отобраны кандидаты в объекты с эффектом Сюняева–Зельдовича. Список наиболее вероятных кандидатов содержит 381 источник. Показано, что поиск объектов такого типа может быть ускорен при использовании априорной информации об отрицательном уровне флуктуаций на карте CMB с удаленными низкими мультиполями в направлении на радиисточники.

Ключевые слова: *радиоконтинуум: галактики — реликтовое излучение*

1. ВВЕДЕНИЕ

Гигантский объем наблюдательной информации, поступающей с наземных и орбитальных телескопов, позволяет в рамках потоковой обработки данных с применением корреляционного анализа значительно увеличить количество членов малочисленных популяций астрофизических объектов. Одним из космических экспериментов, анализ данных которого продолжается, является миссия Planck Европейского космического агентства (ESA). Общий объем информации, доступной для научного анализа, составляет несколько терабайт и требует наличия автоматизации обработки, поиска и отождествления объектов с заданными характеристиками. При этом часть наблюдаемых на картах неба объектов оказывается пропущенной в публикуемых каталогах. Проблема неполноты каталогов может быть решена при помощи новых алгоритмов и программ, чувствительных к топологическим, статистическим и спектральным характеристикам многочастотных карт космических миссий. Таким образом удастся увеличить число отождествленных объектов в текущих каталогах и проводить космологические исследования, используя всю полноту доступной информации.

В последнее десятилетие в наблюдательной астрофизике были проведены несколько обзоров,

которые позволили значительно улучшить точность (лучше 1%) измерения космологических параметров. Среди этих обзоров выделяются эксперименты на космических обсерваториях NASA WMAP [1] и ESA Planck [2] по измерению неоднородностей карты реликтового излучения, а также спектроскопический обзор галактик BOSS (Barion Oscillation Spectroscopic Survey) [3], проводимый в рамках исследования барионных акустических осцилляций как часть Слоановского цифрового обзора неба III (Sloan Digital Sky Survey III) [4]. Анализ данных этих обзоров привел к определению космологических параметров с выдающимся уровнем точности и построению современной эволюционной модели Вселенной от первых долей секунды ее существования до наших дней.

Среди лидирующих направлений в космологических исследованиях остается изучение скоплений галактик в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах, наблюдаемых благодаря эффекту Сюняева–Зельдовича [5], а также в рентгеновском диапазоне, в котором наблюдается излучение горячего газа, и просто в видимом свете. Эти исследования позволяют проследить эволюцию масс скоплений и особенности формирования крупномасштабной структуры Вселенной в различные космологические эпохи.

Существенное расширение списка скоплений галактик в миллиметровом диапазоне связано с по-

*E-mail: vo@sao.ru

явлением многочастотных измерений микроволнового излучения, таких как эксперименты Planck [6], SPT [7] и АСТ [8]. Первые данные обсерватории Planck показали, что зарегистрированное число скоплений галактик (около 1.6 тыс.), наблюдаемых с помощью СЗ-эффекта, значительно (на 2 порядка) меньше, чем ожидается по данным оптических обзоров и по моделированию. Некоторые селекционные эффекты могут влиять на результаты обнаружения скоплений галактик с СЗ-механизмом. Это и трудноудаляемое фоновое излучение нашей Галактики, и точечные источники излучения, вклад которых в микроволновый фон перекрывает глубину СЗ-эффекта, и зависимость амплитуды излучения, определяемой этим эффектом, от массы скоплений, которая может иметь сравнительно большой разброс.

Также важно отметить, что для исследования далекой Вселенной используются и радиоисточники [9–11]. Благодаря набору их физических свойств, радиоисточники являются мощным средством для тестирования космологических эпох. С ними связаны и поиск самых далеких активных ядер галактик [12, 13], и поиск протоскоплений [14], и оценки скучивания фоновых объектов на разных красных смещениях [14, 15], и исследования гравитационного линзирования. С учетом возможностей миллиметровых и субмиллиметровых обзоров естественным образом возникает и задача поиска скоплений галактик, в которых находятся радиоисточники как на малых, так и на больших красных смещениях, с помощью эффекта Сюняева–Зельдовича. В данной работе мы проверяем возможность обнаружения СЗ-эффекта в окрестностях радиоисточников низкочастотного обзора WENSS [16] с применением многочастотных микроволновых карт космической миссии Planck.

2. ДАННЫЕ PLANCK

Данные Planck, благодаря лучшему, чем у WMAP, угловому разрешению (порядка 5 минут дуги) и чувствительности, позволили проводить исследование как точечных источников разных популяций, так и протяженных, размером от нескольких минут до десятков минут дуги, ассоциированных со скоплениями галактик. В этом плане при изучении скоплений галактик в микроволновом диапазоне космическая обсерватория Planck сыграла наиболее существенную роль, а построенные в результате ее работы карты полного неба на девяти частотах микроволнового диапазона: 30, 44, 70, 100, 143, 217, 353, 545 и 847 ГГц, являются основой для большого числа исследований, проводящихся в научных институтах разных стран. Карты спутника

Planck¹ [17] Европейского космического агентства были открыты для научного сообщества в 2013 г. и сразу стали эффективным инструментом в решении многих задач галактической и внегалактической астрономии. Кроме того, были представлены каталоги обнаруженных источников миллиметрового и субмиллиметрового излучения, имеющих галактическое и внегалактическое происхождение. Измерения потоков излучения в миссии были проведены на высокочастотном комплексе (High Frequency Instrument — HFI) с полосами 100 ГГц и на более высоких частотах, а также на низкочастотном (Low Frequency Instrument — LFI) с полосами на частотах ниже 100 ГГц. Угловое разрешение карт на частоте 30 ГГц составило около 32', на частотах выше 145 ГГц — порядка 5'. Точность определения координат источников на различных наблюдательных частотах варьируется от 50" до 40" [18]. Архив миссии Planck (Planck Legacy Archive — PLA²) содержит как карты компонент излучения, так и списки обнаруженных объектов, включая скопления галактик с эффектом Сюняева–Зельдовича.

Напомним, что различают два вида СЗ-эффекта: тепловой (tSZ), когда фотоны рассеиваются при случайном движении тепловых электронов, и кинематический (kSZ), обусловленный общим объемным движением электронов [19, 20]. 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» 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 СЗ-эффект связан с обратным комптоновским взаимодействием фотонов СМВ и свободными электронами горячего газа скоплений галактик. В результате рассеяния эффективный спектр отклоняется от чернотельного. Единственный свободный параметр — параметр комптонизации Y_{SZ} , который описывается просто амплитудой. Микроволновый спектр скопления галактик, наблюдаемый в результате СЗ-эффекта, приводит к отрицательному сигналу на частотах 30–143 ГГц и положительному — на частотах выше 217 ГГц. Эта особенность является уникальным наблюдательным проявлением, позволяющим выделять его среди других вариаций фона. Так

¹<http://www.rssd.esa.int/Planck/>

²<http://pla.esac.esa.int/>

как эффект слабый, его удается зарегистрировать только для наиболее ярких скоплений галактик. Для более слабых объектов карта Y_{SZ} становится чувствительной и к параметрам моделирования, и к систематическим ошибкам.

Задача обнаружения и исследования скопленных галактик по эффекту Сюняева–Зельдовича — одна из самых главных среди заявленных в миссии Планк, а также в других современных исследованиях СМВ с хорошим угловым разрешением [21–23]. СЗ-эффект дает ряд преимуществ при изучении скоплений галактик. Параметр комптонизации Y_{SZ} , с помощью которого измеряют интегральное давление газа вдоль луча зрения и амплитуду СЗ-сигнала, не испытывает космологического ослабления по поверхностной яркости. Это делает СЗ-эффект мощным методом поиска скоплений галактик на больших красных смещениях. По полному СЗ-сигналу, интегрированному по угловому размеру, напрямую измеряют общую тепловую энергию газа и, следовательно, массу, с которой, как ожидается, коррелирует температура газа.

По результатам 29 месяцев наблюдений миссии Planck был подготовлен каталог, содержащий 1653 скопления галактик и кандидатов в скопления, в которых проявляется СЗ-эффект. Из них 1203 подтверждены оптическими наблюдениями. Представленный каталог охватывает область, занимающую 83.5% неба, и является крупнейшим и наиболее полным, включающим 1094 объекта с известными красными смещениями вплоть до $z \sim 1$. Массы скоплений распределены в довольно широком диапазоне $(0.1–1.6) \times 10^{15} M_{\odot}$.

3. ПОСТРОЕНИЕ АЛГОРИТМА

3.1. Селекция объектов

В данной работе мы развиваем предложенный ранее [24] метод селекции кандидатов в скопления галактик с помощью каталогов радиисточников и карт космического микроволнового фонового излучения. Суть метода заключается в использовании космологических свойств формирования мощных внегалактических радиисточников. 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 [11, 25, 26]. Правда,

следует отметить, что самыми мощными радиисточниками являются галактики в период большого мерджинга, в результате которого и формируются gE, а также то, что не все gE-галактики являются родительскими объектами для мощных радиисточников. Еще один момент, связанный с гигантскими эллиптическими галактиками, состоит в том, что их изучение важно и при прослеживании эволюции звездных систем на больших красных смещениях и при поиске далеких групп галактик или протоскоплений галактик, в центре которых они находятся, и при исследовании процессов слияния и взаимодействия, на которые может указывать проявляющаяся активность их ядер. Эпоха, на время которой приходится пик слияний галактик, продолжается во Вселенной возрастом от 1.5 до 4 млрд лет, что соответствует красным смещениям от 5 до 1.2 в стандартной Λ CDM-космологической модели (модель с доминированием темной энергии и холодной темной материи). Так, в работе [14], посвященной исследованию окружения далеких радиогалактик по наблюдениям Ly- α , измерялось красное смещение, и с использованием данных о плотности объектов делался вывод об их принадлежности к протоскоплению. Было показано, что 75% радиогалактик с $z > 2$ ассоциируются с протоскоплениями. Отсюда авторы получили оценку, что приблизительно 3×10^{-8} формирующихся скоплений попадают в интервал $2 < z < 5.2$ на сопутствующий куб со стороной 1 Мпк с активным радиисточником. Однако очень вероятно, что в заданном диапазоне красных смещений число протоскоплений галактики может быть больше, т.к. активный радиисточник может просто не наблюдаться. Таким образом, основываясь лишь на данных радиообзоров: каталогах радиисточников и картах микроволнового фона, можно отобрать объекты — кандидаты в скопления галактик.

Использование каталога обзора WENSS (The Westerbork Northern Sky Survey), проведенного на северном небе с помощью Вестерборкского радиотелескопа в Нидерландах, неслучайно. Обзор WENSS [16] был выполнен на частоте 325 МГц и характеризуется предельным уровнем плотности потока около 18 мЯн (что соответствует примерно 5σ). Угловое разрешение радиоинтерферометра — $54'' \times 54'' \cos \delta$, где δ — склонение. Обзор покрывает северную часть неба выше 29° по склонению. Хорошая чувствительность на низкой частоте позволяет отождествлять радиисточники с данными обзоров, проведенных на более высоких частотах. Это в свою очередь дает возможность отбирать источники с крутыми радиоспектрами, которые ассоциируются с далекими радиогалактиками [14, 27, 28]. Таким образом, применение низкочастотного каталога радиисточников при поиске объектов с эффектом Сюняева–Зельдовича

помогает выявить кандидаты в далекие скопления галактик. Первые поиски эффекта с помощью данных WENSS были проведены в работах [29, 30], и здесь мы развиваем предложенный подход. Площадь обзора WENSS составляет порядка 10 000 кв.градусов, а каталог содержит 211 234 радиоисточника. На рис. 1а черным цветом показано заполнение области обзора радиоисточниками при наложении на карту реликтового излучения. Каталог разбит на получасовые записи по прямому восхождению, и для начального анализа мы использовали данные первых двух часов. В исследуемом интервале оказались 16 384 объекта. Анализируемая площадь показана на рис. 1б.

3.2. Алгоритм селекции

Алгоритм отбора кандидатов включает несколько этапов:

- Вырезание зоны в окрестности радиоисточников низкочастотного каталога WENSS [16] со стороной $30'$ на частотных картах 100, 143, 217, 353, 545 ГГц и на карте реликтового излучения, превышающей размер диаграммы направленности на частоте 217 ГГц примерно в шесть раз (и в три раза поисковый размер, используемый при анализе данных в работах Planck [18]).
- Выделение потенциальных СЗ-источников с помощью стандартной программы поиска SExtractor [31] в радиусе 7 минут дуги от центра площадки (при ширине диаграммы направленности радиотелескопа порядка $5'$) на частотах 100 и 143 ГГц — с отрицательной амплитудой, а на 353 и 545 ГГц — с положительной.
- Сравнение амплитуды детектированного источника на частотах 100 и 143 ГГц, $|S_{100}| > |S_{143}|$, и проверка наличия источника с положительной амплитудой на частоте 217 ГГц.
- Контроль отобранных объектов визуальным методом.
- Дополнительный контроль — проверка наличия минимума на карте реликтового излучения с удаленными низкими ($\ell \leq 20$) мультиполями. Удаление низких мультиполей, содержащих статистически анизотропный сигнал [32], уменьшает искажения в площадках (рис. 2), что в свою очередь увеличивает контраст меньших неоднородностей. Минимум на карте СМВ наблюдается в направлении скопления галактик с проявлением СЗ-эффекта. Он образуется в результате выполнения процедуры разделения компонент [33].

Блок-схема селекции кандидатов в объекты с эффектом Сюняева–Зельдовича показана на рис. 3.

Для прохождения этапов селекции были разработаны специализированные командные файлы на языке управления заданиями Shell в операционной среде ОС Linux Scientific 6.4. Базовые утилиты (команды) работы с изображениями (вырезание из исходных карт `mapcut` и подготовка графического анализа `f2fig`) вызывались из пакета GLESP [34, 35]. Для выделения источников использовалась программа SExtractor [31]. Промежуточные карты готовились и сохранялись в архиве в стандартном астрономическом формате описания изображений FITS [36]. Отформатированные карты всего неба в микроволновом диапазоне в стандарте GLESP, которые использовались для анализа изображений, доступны на сайте СМВ³ [37].

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

4.1. Популяция радиоисточников

Каталог радиоисточников, отобранных по предложенной методике, содержит 381 объект WENSS из диапазона прямых восхождений $0^h \leq \alpha < 2^h$, отобранный при дополнительном визуальном контроле.

На рис. 4 приведена статистика спектральных индексов на частотах 326 МГц, 1.4 и 4.85 ГГц для популяции отобранных радиоисточников. На рис. 5 показана диаграмма «спектральный индекс γ на частоте 1.4 ГГц — вариация температуры СМВ.» Распределение уровня флуктуаций на карте СМВ SMICA Planck с мультиполями $20 < \ell \leq 2500$ в направлении на радиоисточники продемонстрировано на рис. 6. 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 `s12map` пакета GLESP [34].

Распределение по спектральным индексам (рис. 4) позволяет выделить популяцию источников с предпочтительным наклоном радиоспектра, который описывает радиоизлучение объекта в скоплении с наблюдаемым эффектом Сюняева–Зельдовича. Медианное значение спектрального индекса выборки на частоте 1.4 ГГц оказалось равным $\gamma_{\text{med}} = -0.79$. Дополнительным свойством выборки, характеризующим популяцию, является отрицательное медианное значение сигнала на карте неоднородностей СМВ SMICA, построенной в диапазоне мультиполей $\ell \in [21-2500]$,

³<http://cmb.sao.ru>

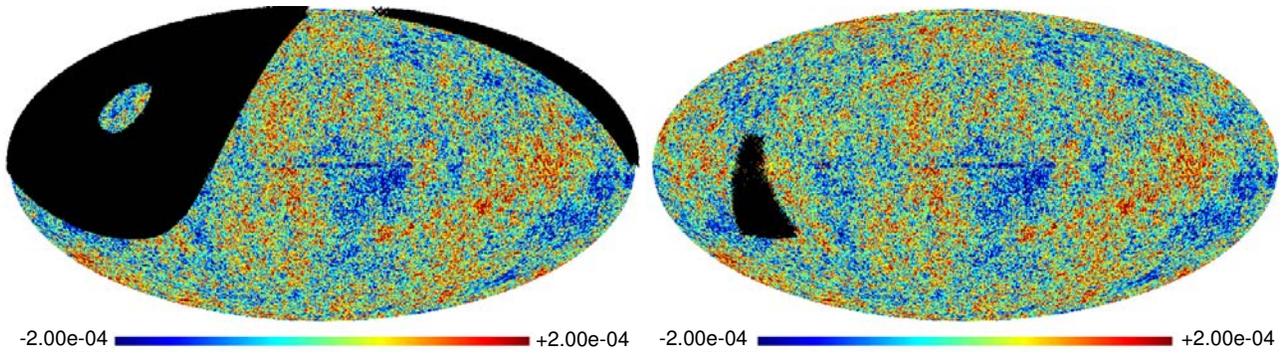


Рис. 1. Карта реликтового излучения SMICA Planck в галактических координатах. Черным цветом показано заполнение радиоисточниками (а) полного обзора WENSS (24 часа по прямому восхождению) радиоисточниками, (б) области обзора WENSS (границы области по прямому восхождению: $0^h < \alpha < 2^h$).

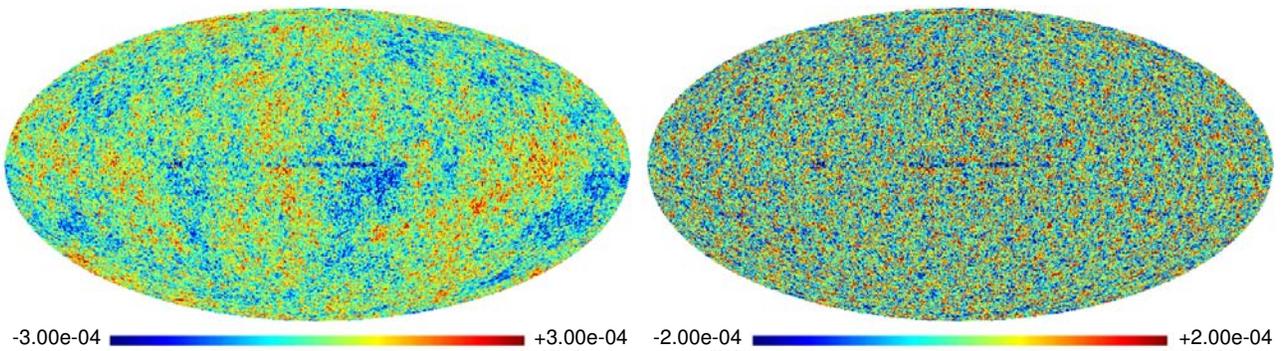


Рис. 2. Карта CMB SMICA Planck [17]: верху: карта CMB с полным набором сферических гармоник ($2 \leq l \leq 2500$); внизу: карта CMB с $20 < l \leq 2500$.

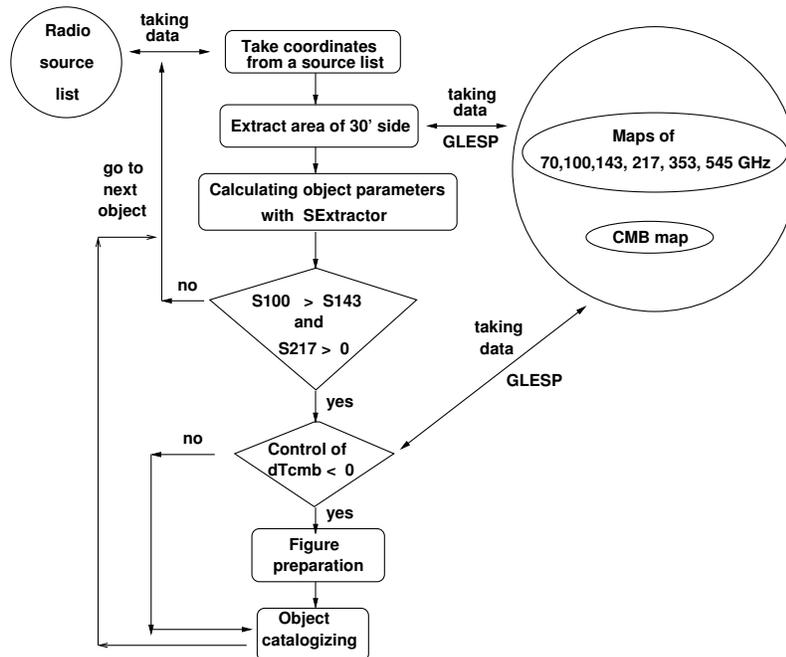


Рис. 3. Блок-схема селекции кандидатов в объекты с эффектом Сюняева–Зельдовича в окрестности радиоисточников.

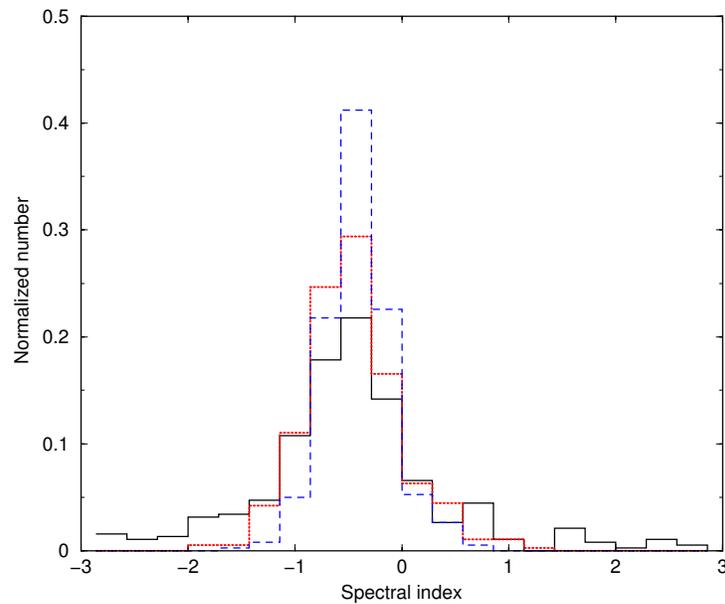


Рис. 4. Нормированное распределение спектральных индексов популяции радиисточников WENSS с СЗ-эффектом из диапазона R.A. $0^h \leq \alpha < 2^h$ на частотах 325 МГц (сплошная линия), 1.4 (пунктирная линия) и 4.85 ГГц (штриховая линия).

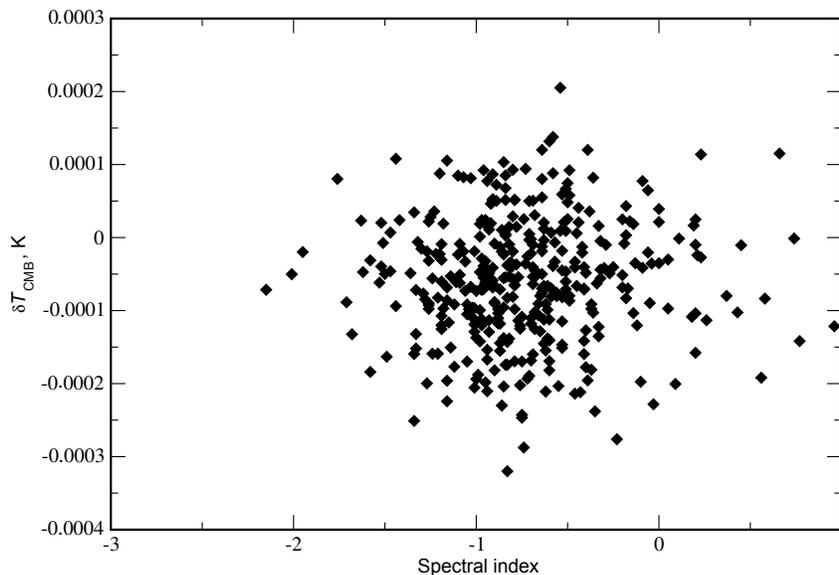


Рис. 5. Диаграмма «спектральный индекс $\gamma_{1.4 \text{ GHz}}$ — вариация СМВ $\delta T_{\ell \in [21;2500]}$ » для радиисточников исследуемой подвыборки.

в направлении на радиисточник (см. рис. 5). Мы сравнили распределение откликов на карте СМВ SMICA в направлении на радиисточники с ожидаемым в Λ CDM-космологической модели по данным 200 случайных гауссовых реализаций СМВ (рис. 6). 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 .

4.2. Статистика отождествлений

Разработанный набор процедур на основе утилит пакета GLESP [35] был применен в процессе обработки карт неба в области исследуемой части обзора. Как уже говорилось ранее, для анализа

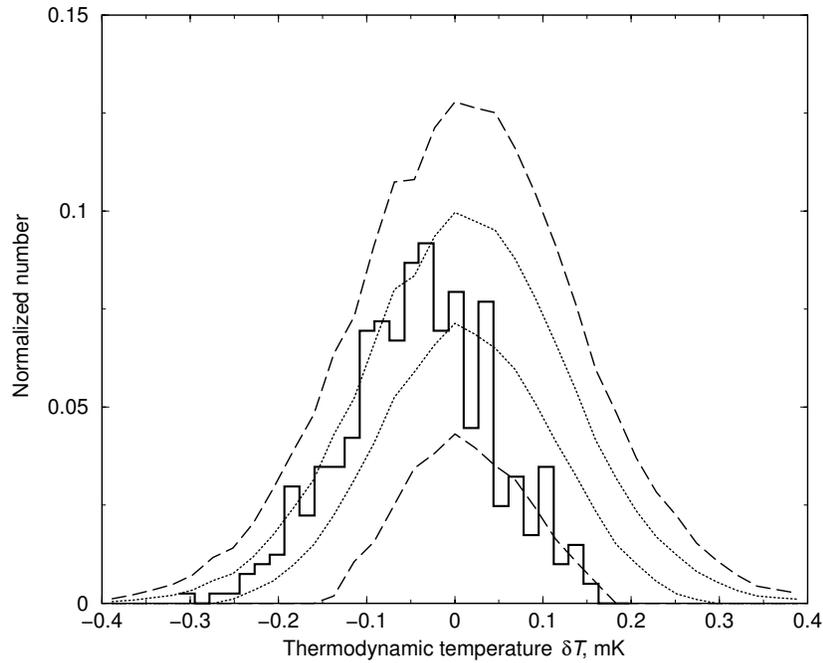


Рис. 6. Распределение уровня флуктуации СМВ в направлении на радиосточники исследуемой подвыборки. Использована карта СМВ SMICA Planck с мультиполями $20 < \ell \leq 2500$. Штриховыми линиями показаны распределения $\pm 1\sigma$ - и $\pm 3\sigma$ -уровней флуктуаций в стандартной Λ CDM-космологической модели по данным 200 реализаций случайной гауссовой карты СМВ.

мы использовали данные по радиосточникам каталога WENSS в диапазоне прямых восхождений $0^{\text{h}} < \alpha < 2^{\text{h}}$ и склонений $20^\circ < \delta < 76^\circ$, содержащих астрометрическую (координаты) и астрофизическую (плотности потока) информацию на частоте 325 МГц, для 16 364 объектов. После автоматической процедуры селекции кандидатов были отобраны 1778 объектов (10.9% от общего списка), из которых после визуальной инспекции был оставлен 381 источник (2.3% от общего списка) с наиболее типичными контрастными признаками наличия эффекта. Данные работы алгоритма и последующего визуального контроля сведены в таблицу 1.

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

Таблица 1. Распределение объектов по интервалам прямого восхождения (первый столбец). Во втором столбце приведено количество радиосточников в соответствующем интервале прямых восхождений каталога WENSS. В третьем — число объектов, отобранных по критерию наличия отрицательных пиков на частотах 100 и 143 ГГц и положительного пика на частоте 353 ГГц, в четвертом столбце приведены данные отбора наиболее ярких (контрастных) примеров объектов с эффектом Сюняева–Зельдовича. В скобках указано процентное содержание от числа объектов в исходном каталоге

RA, hh mm	N_{WENSS}	$N_{100\&143}$	N_{visual}
(1)	(2)	(3)	(4)
$00\ 00 \leq \alpha \leq 00\ 30$	4170	421 (10.1%)	144 (3.4%)
$00\ 30 \leq \alpha \leq 01\ 00$	4215	481 (11.4%)	104 (2.5%)
$01\ 00 \leq \alpha \leq 01\ 30$	4021	428 (10.6%)	65 (1.6%)
$01\ 30 \leq \alpha \leq 02\ 00$	3958	448 (11.3%)	68 (1.7%)

максимум на низких или на всех частотах, и часто даже на опубликованной карте реликтового излучения. Кроме того, было проведено отождествление найденных объектов с каталогом СЗ-объектов миссии Planck [40] и каталога данных обзора SDSS [41], содержащего близкие скопления галактик с красными смещениями $z < 0.42$. Было обнаружено шесть совпадений с объектами каталога Planck, в котором насчитывается порядка

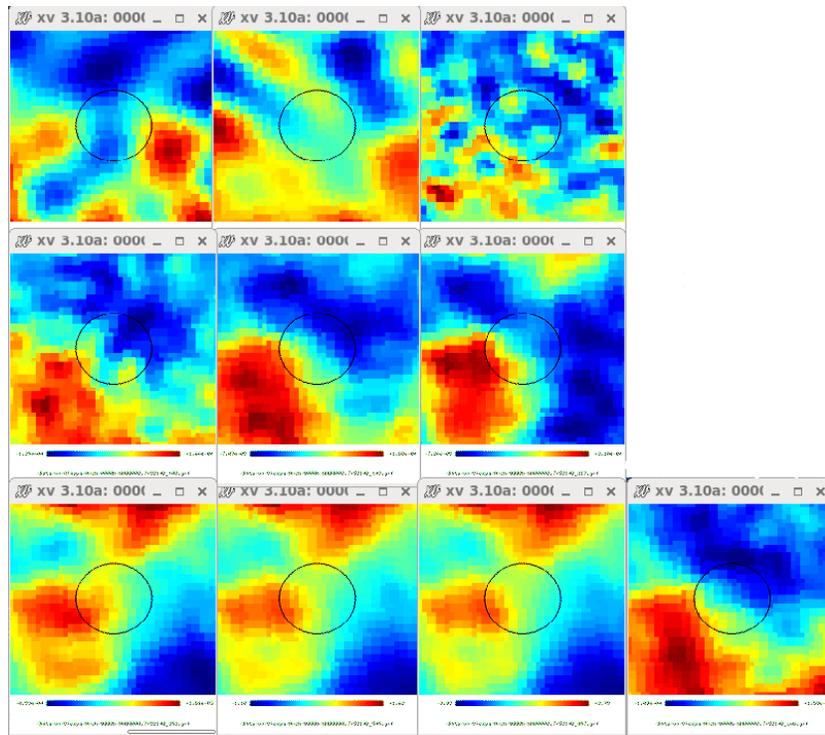


Рис. 7. Изображения области размером $30' \times 30'$ вокруг радиосточника WNB 0008.7+5121 из каталога WENSS на картах космической миссии Planck соответственно справа налево сверху вниз на частотах 30, 44, 70, 100, 143, 217, 353, 545, 857 ГГц, а также (последняя картинка) — на карте реликтового излучения. Объект отождествляется со списком скоплений галактик с эффектом Сюняева–Зельдовича из соответствующего каталога миссии Planck.

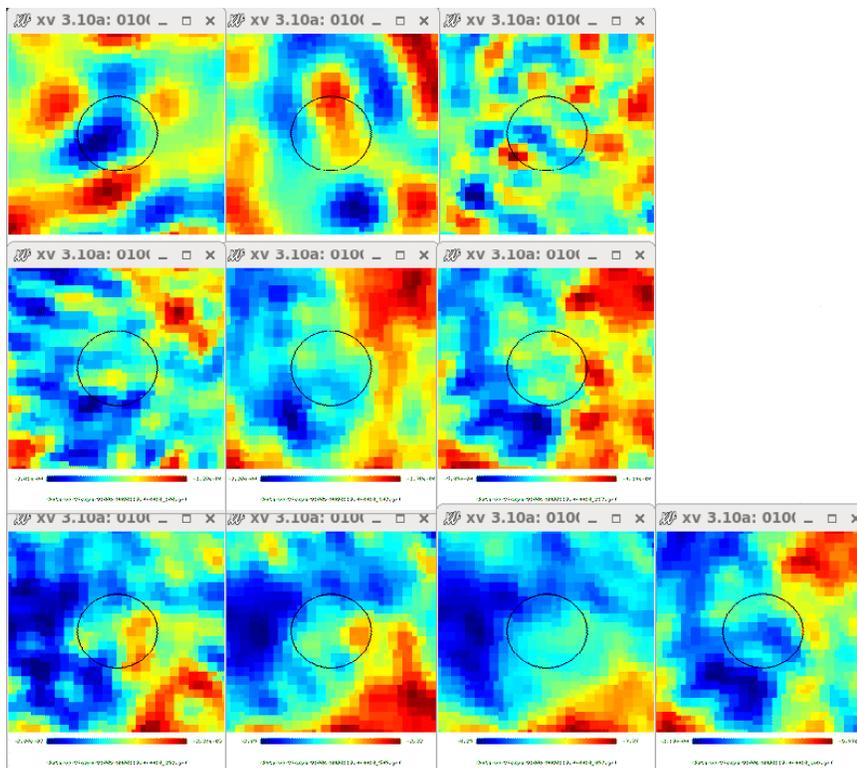


Рис. 8. То же, что на рис. 8, в окрестности радиосточника WNB 0119.4+4418.

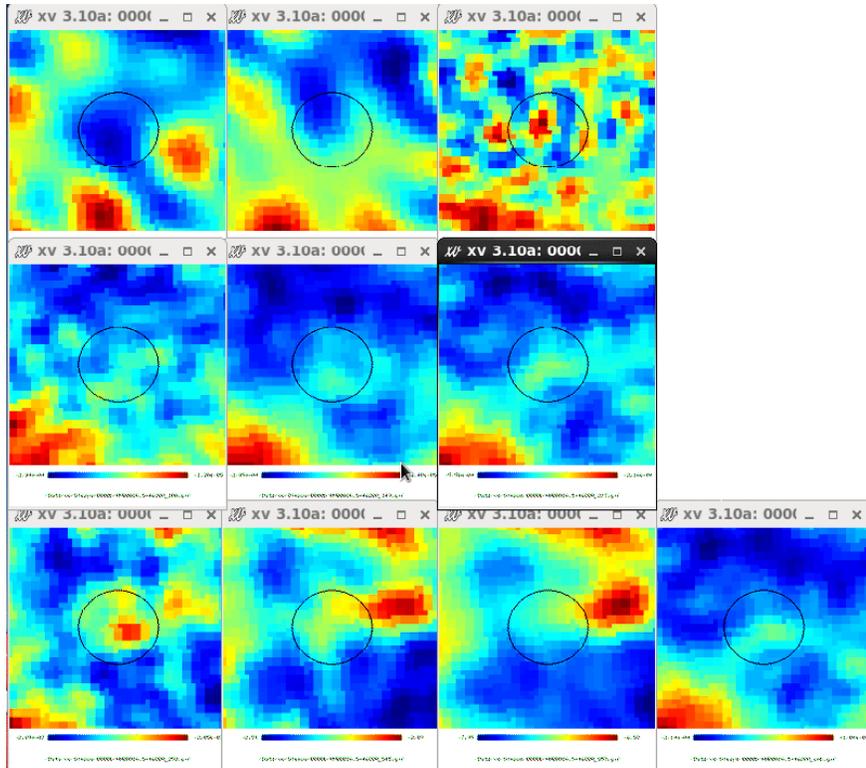


Рис. 9. Изображения области размером $30' \times 30'$ в окрестности радиоисточника WNB 0016.5+4628 из каталога WENSS на картах космической миссии Planck соответственно справа налево сверху вниз на частотах 30, 44, 70, 100, 143, 217, 353, 545, 857 ГГц, а также (последняя картинка) — на карте реликтового излучения. Новый объект — кандидат в скопление с эффектом Сюняева–Зельдовича.

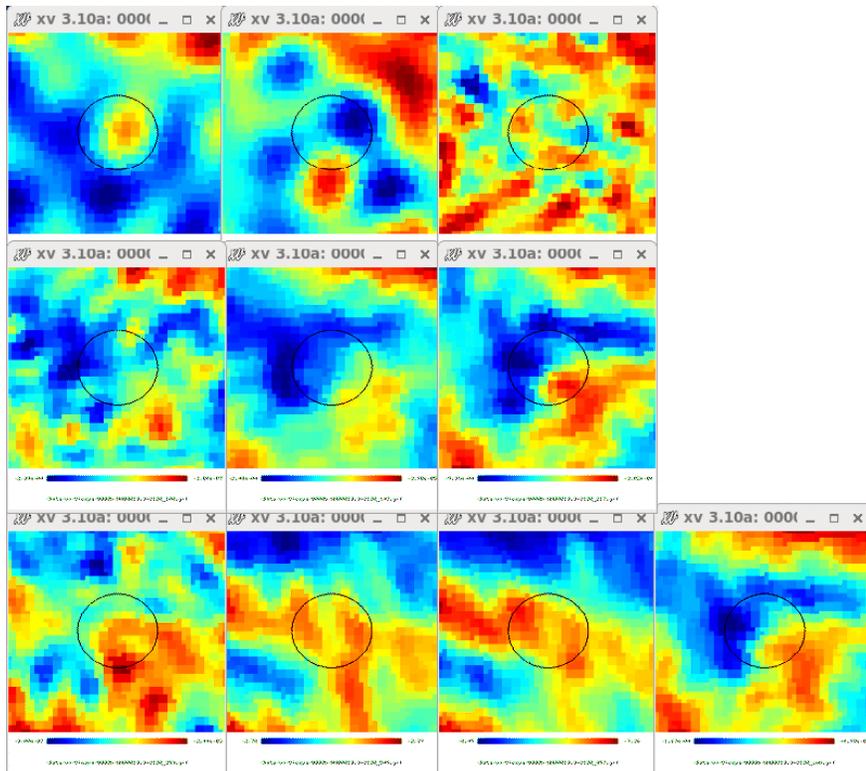


Рис. 10. То же, что на рис. 10, в окрестности радиоисточника WNB 0019.3+3120.

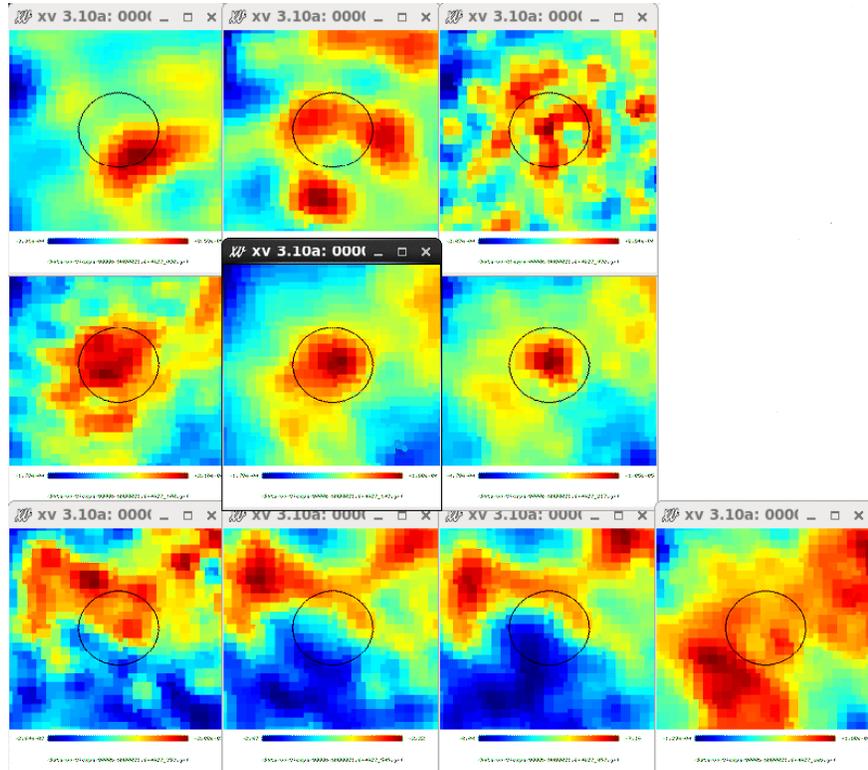


Рис. 11. Изображения области размером $30' \times 30'$ вокруг радиосточника WNB 0021.6+5627 из каталога WENSS на картах космической миссии Planck соответственно справа налево сверху вниз на частотах 30, 44, 70, 100, 143, 217, 353, 545, 857 ГГц, а также (последняя картинка) — на карте реликтового излучения. Радиосточник наблюдается на всех картах.

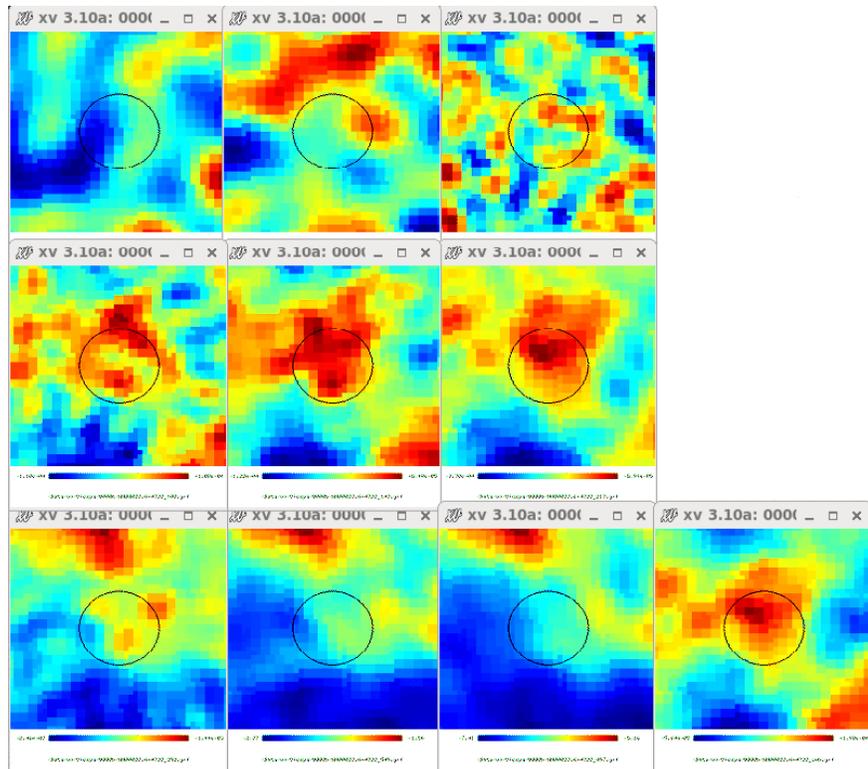


Рис. 12. То же, что на рис. 12, в окрестности радиосточника WNB 0023.6+4723.

1.6 тыс. объектов, а также 19 совпадений с данными по скоплениям из обзора SDSS. Любопытным фактом является детектирование 72 радиисточников не только на картах, построенных для многочастотных данных, но и на карте реликтового излучения. Примеры обнаружения объекта отождествления в результате работы алгоритма показаны на рис. 7–12. На рис. 7 и 8 приведены изображения области вокруг радиисточников WENSS из нашего списка с искомым сигналом на разных частотах, для которых имеются отождествления с объектами из каталога скоплений Planck. На рис. 9 и 10 показаны многочастотные изображения новых объектов, имеющих топологию сигнала, ожидаемую при наличии СЗ-эффекта. На рис. 11 и 12 даны изображения радиисточников на разночастотных картах Planck и на карте СМВ.

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

1) Кандидаты в объекты со слабо наблюдаемым эффектом Сюняева–Зельдовича на картах миссии Planck есть. На полном небе их, как минимум, в 10–30 раз больше, чем в опубликованных списках. Этот факт снимает противоречие между ожидаемым количеством скоплений галактик с СЗ-эффектом и их зарегистрированным числом.

2) Эффект «ямки» на карте СМВ при отборе радиисточников — кандидатов в СЗ-объекты имеет место. И это позволяет проводить независимое тестирование на существование скопления галактик в области расположения радиисточника. Отметим, что такой отрицательный сигнал образуется как остаточный эффект после процедуры разделения компонент излучения без учета априорной информации о наличии массивного скопле-

ния галактик (с существующим СЗ-эффектом) в данном направлении на небе.

3) В полях радиисточников часто наблюдается родительский объект, излучение от которого остается на карте СМВ, полученной в результате разделения компонент протяженного фонового сигнала. Несмотря на множественные обнаружения подобных радиисточников на карте СМВ, они не дают существенного вклада в определенные космологических параметров, так как приносят искажения лишь в высокочастотную часть углового спектра мощности. Эта область менее значима, чем низкочастотная, при определении космологии.

4) Радиисточники в скоплениях галактик могут экранировать эффект Сюняева–Зельдовича в миллиметровом диапазоне длин волн. Это уменьшает возможность его обнаружения.

Список радиисточников каталога WENSS — кандидатов, находящихся в скоплениях галактик с эффектом Сюняева–Зельдовича, приведен в таблице 2. В колонках указаны имя объекта из каталога WENSS, его координаты, величина анизотропии температуры на карте СМВ SMICA ($20 < \ell \leq 2500$) и спектральный индекс γ ($S \sim \nu^\gamma$) на частоте 1.4 ГГц, рассчитанный как тангенс угла наклона касательной к непрерывному радиоспектру. Радиоспектры строились с использованием плотностей потоков источников, измеренных в разных обзорах, из базы данных CATS (<http://cats.sao.ru>) и процедуры анализа радиоспектров spg [38] системы обработки континуальных данных на PATAH-600 [39].

Таблица 2. Список отобранных источников с наличием эффекта Сюняева–Зельдовича из каталога WENSS в диапазоне прямых восхождений $0^h \leq \alpha < 2^h$ на эпоху каталога (1950.0). В столбцах таблицы приведены имя радиисточника по каталогу (индекс s указывает на наличие отождествления в [41], индекс p — в [40]), экваториальные координаты на эпоху 2000.0, величина анизотропии температуры на карте СМВ SMICA ($20 < \ell \leq 2500$) и значение спектрального индекса на частоте 1.4 ГГц

Имя WENSS, WNB	RA + Dec hh mm ss + dd mm ss	δT , $10^{-6}K$	Sp.In.
(1)	(2)	(3)	(4)
0000.0 + 3207	00 02 36 + 32 24 29	−2467	−0.75
0000.1 + 4016	00 02 44 + 40 32 53	867	−0.91
0000.3 + 3537 ^s	00 02 53 + 35 54 10	−866	−0.49
0000.5 + 3038 ^s	00 03 04 + 30 54 57	−624	−0.95
0001.0 + 3849	00 03 37 + 39 06 22	−1742	−0.84
0001.1 + 3439	00 03 45 + 34 56 18	−98	0.20
0001.1 + 4651	00 03 42 + 47 08 34	213	−0.00
0001.2 + 3358	00 03 48 + 34 15 32	−611	−1.11
0001.2 + 3416C ^s	00 03 53 + 34 34 44	−660	−0.90

Таблица 2. (Продолжение)

Имя WENSS, WNB	RA + Dec hh mm ss + dd mm ss	δT , 10^{-6}K	Sp.In.
(1)	(2)	(3)	(4)
0001.2 + 3755	00 03 51 + 38 12 04	92	-0.54
0001.2 + 3803B	00 03 52 + 38 20 53	-473	-1.62
0001.6 + 3455	00 04 14 + 35 12 40	-381	-0.83
0001.8 + 3002	00 04 25 + 30 18 52	194	-0.92
0001.8 + 4134	00 04 25 + 41 51 35	-565	-0.80
0001.8 + 5244	00 04 25 + 53 00 54	-1406	-0.60
0001.9 + 5247	00 04 32 + 53 04 27	-1468	-0.53
0002.0 + 2905	00 04 35 + 29 22 28	851	-0.84
0002.0 + 2943	00 04 35 + 30 00 30	928	-0.80
0002.2 + 3145	00 04 48 + 32 01 52	-705	-0.96
0002.2 + 3425	00 04 52 + 34 42 40	-359	-0.73
0002.3 + 3617	00 04 53 + 36 34 31	191	-1.18
0002.5 + 4804	00 05 08 + 48 21 39	253	-0.74
0002.7 + 3407	00 05 22 + 34 24 08	-488	-1.36
0002.8 + 4935	00 05 24 + 49 51 48	-1249	-0.76
0002.8 + 4958	00 05 27 + 50 15 16	-1289	-1.01
0002.9 + 2934	00 05 30 + 29 50 52	677	-0.84
0003.0 + 3447	00 05 37 + 35 04 37	253	-0.50
0003.0 + 4709	00 05 39 + 47 26 41	105	-0.86
0003.2 + 4243	00 05 52 + 43 00 13	-351	-0.13
0003.3 + 3322	00 05 57 + 33 39 16	518	-0.79
0003.4 + 4244	00 06 03 + 43 01 27	-351	0.00
0003.4 + 4614	00 06 02 + 46 31 36	69	-1.47
0003.5 + 3413	00 06 10 + 34 29 48	-502	-2.01
0003.6 + 3326	00 06 16 + 33 43 28	1054	-1.16
0003.7 + 5324	00 06 21 + 53 41 32	-1932	-0.72
0004.5 + 4416	00 07 10 + 44 33 16	147	-0.82
0004.8 + 3510	00 07 26 + 35 27 03	290	-0.80
0005.2 + 5955	00 07 50 + 60 12 26	-1879	-0.99
0005.4 + 4057	00 08 01 + 41 14 02	358	-1.23
0005.4 + 4608	00 08 05 + 46 24 54	502	-0.89
0005.8 + 3815	00 08 25 + 38 32 25	-911	-0.62
0005.9 + 4104	00 08 33 + 41 20 48	-47	-0.32
0006.4 + 2941	00 09 01 + 29 58 06	505	-0.69
0006.4 + 4754	00 09 00 + 48 11 18	-305	-1.19
0006.8 + 3729	00 09 25 + 37 45 55	-2109	-0.62
0006.8 + 4744	00 09 27 + 48 01 29	282	-1.25
0007.3 + 3015 ^s	00 09 53 + 30 32 03	-1271	-0.40
0007.5 + 3124 ^s	00 10 06 + 31 40 43	-926	-1.26
0007.6 + 4629	00 10 15 + 46 46 21	2051	-0.54
0007.8 + 3126	00 10 25 + 31 42 55	-698	-0.41
0008.6 + 3159B	00 11 20 + 32 15 22	-638	-0.69
0009.0 + 3203 ^{s,p}	00 11 41 + 32 20 15	-756	-0.56
0009.0 + 3601	00 11 39 + 36 17 43	-417	-0.30

Таблица 2. (Продолжение)

Имя WENSS, WNB	RA + Dec hh mm ss + dd mm ss	δT , 10^{-6}K	Sp.In.
(1)	(2)	(3)	(4)
0009.1 + 3209	00 11 45 + 32 25 42	-469	-0.93
0010.2 + 4016	00 12 53 + 40 32 47	-1376	-0.85
0010.2 + 4347	00 12 55 + 44 04 06	-1321	-1.33
0010.2 + 4529	00 12 51 + 45 46 16	-715	-2.15
0010.2 + 4611	00 12 53 + 46 28 26	515	-0.84
0010.3 + 5237	00 12 59 + 52 54 27	-639	-0.94
0010.4 + 3013	00 13 03 + 30 30 21	-1769	-1.12
0010.6 + 4750	00 13 16 + 48 07 35	-1061	-0.66
0011.7 + 3055	00 14 22 + 31 11 42	-989	-0.61
0012.1 + 4809A	00 14 40 + 48 25 16	-981	-1.04
0012.1 + 4809B	00 14 47 + 48 26 18	-981	-1.02
0012.4 + 4531	00 15 04 + 45 48 04	-1200	-0.97
0012.6 + 2957	00 15 16 + 30 14 18	-536	-0.69
0012.7 + 4929	00 15 23 + 49 45 60	802	-0.64
0013.1 + 3225	00 15 43 + 32 42 14	591	-0.53
0013.2 + 3358	00 15 49 + 34 15 22	-329	-1.06
0013.2 + 5024	00 15 55 + 50 41 25	877	-1.20
0013.2 + 5424	00 15 55 + 54 41 27	-317	-1.26
0013.3 + 3348	00 15 60 + 34 05 21	-231	-0.85
0013.3 + 5021	00 15 58 + 50 38 29	922	-0.96
0013.4 + 3227	00 16 04 + 32 44 32	483	-0.50
0013.7 + 5140	00 16 24 + 51 57 31	775	-0.94
0013.9 + 3845	00 16 36 + 39 01 54	-409	-0.46
0014.0 + 3506	00 16 40 + 35 22 53	250	-0.20
0014.1 + 3920	00 16 49 + 39 37 20	-487	-0.93
0014.1 + 7449	00 16 57 + 75 05 41	1151	0.66
0014.2 + 3931	00 16 54 + 39 48 12	-468	-0.94
0014.2 + 5719	00 16 56 + 57 35 51	391	0.00
0014.9 + 4509	00 17 37 + 45 26 23	-980	-0.79
0014.9 + 7523	00 17 52 + 75 40 38	-217	-0.70
0015.6 + 3132 ^s	00 18 16 + 31 49 15	-1552	-0.87
0016.0 + 3023	00 18 40 + 30 40 25	-1452	-0.63
0016.2 + 3540	00 18 51 + 35 57 17	-1105	-0.88
0016.4 + 3830	00 19 04 + 38 46 55	-534	-0.82
0016.5 + 3256C	00 19 21 + 33 13 19	-14	0.11
0017.4 + 4313	00 20 07 + 43 30 09	-1372	-1.00
0017.8 + 3050	00 20 25 + 31 06 54	-2104	-0.94
0018.0 + 4521	00 20 41 + 45 37 44	-391	-0.58
0018.7 + 4251	00 21 26 + 43 07 45	-2022	-0.76
0018.7 + 4737	00 21 22 + 47 54 30	241	-0.95
0018.8 + 3425A	00 21 24 + 34 44 45	1200	-0.39
0018.8 + 3425 ^s	00 21 26 + 34 42 32	1033	-0.85
0018.8 + 3459B ^p	00 21 28 + 35 17 19	-1697	-0.75
0019.1 + 4311	00 21 48 + 43 28 25	-1938	-1.00

Таблица 2. (Продолжение)

Имя WENSS, WNB	RA + Dec hh mm ss + dd mm ss	δT , $10^{-6}K$	Sp.In.
(1)	(2)	(3)	(4)
0019.2 + 4358	00 21 52 + 44 15 27	-477	-0.95
0019.6 + 4739	00 22 21 + 47 56 17	241	-0.97
0020.0 + 4402A	00 22 32 + 44 18 17	-368	-0.78
0020.1 + 3252	00 22 48 + 33 09 06	881	-0.58
0020.4 + 3649	00 23 07 + 37 05 53	-1207	-0.76
0020.9 + 3710	00 23 36 + 37 26 59	-1698	-1.05
0021.1 + 4915	00 23 51 + 49 31 47	48	-0.84
0021.4 + 4038	00 24 04 + 40 55 21	-662	-0.63
0021.5 + 3702 ^s	00 24 12 + 37 18 45	-2039	-0.85
0021.7 + 5815	00 24 29 + 58 32 11	120	-0.63
0022.0 + 3012	00 24 42 + 30 29 26	-2300	-0.86
0022.2 + 4102	00 24 55 + 41 19 05	-523	-0.68
0022.4 + 3124	00 25 03 + 31 41 26	-1022	-0.68
0022.4 + 4038	00 25 05 + 40 55 29	-662	-0.61
0022.6 + 3354	00 25 20 + 34 11 08	1378	-0.58
0023.3 + 4153	00 26 02 + 42 09 40	-462	-1.47
0024.0 + 4839	00 26 45 + 48 55 55	1317	-0.60
0024.1 + 3008	00 26 45 + 30 25 35	-2428	-0.75
0024.3 + 3407	00 26 60 + 34 24 33	667	-0.51
0024.5 + 4618	00 27 16 + 46 34 57	-99	-0.69
0024.6 + 4230A	00 27 16 + 42 45 15	-1215	0.96
0024.6 + 4230	00 27 18 + 42 46 59	-1591	-1.24
0024.6 + 4230B	00 27 19 + 42 47 49	-1591	-1.21
0024.9 + 3811	00 27 34 + 38 27 36	-712	-0.41
0025.0 + 3146	00 27 44 + 32 03 17	-1840	-1.58
0025.0 + 4205	00 27 44 + 42 21 44	-1095	-1.02
0025.8 + 3928	00 28 34 + 39 44 41	-994	-0.98
0025.8 + 3931	00 28 31 + 39 48 26	-1137	-0.77
0026.2 + 4616	00 28 59 + 46 33 08	-67	-0.57
0026.7 + 3016	00 29 25 + 30 33 28	-1692	-0.60
0026.9 + 4405	00 29 37 + 44 22 11	28	-0.84
0027.0 + 3932	00 29 44 + 39 48 40	941	-0.73
0027.1 + 7135	00 30 10 + 71 51 47	159	-0.33
0027.2 + 4143	00 29 55 + 42 00 25	-74	-1.51
0027.3 + 4659	00 30 06 + 47 15 43	-683	-0.20
0027.4 + 4624	00 30 12 + 46 40 36	-405	-0.41
0027.7 + 4035	00 30 25 + 40 52 33	185	-0.14
0027.9 + 4220	00 30 40 + 42 37 06	513	-0.79
0027.9 + 5847	00 30 43 + 59 04 20	-1284	-0.65
0028.0 + 3418A	00 30 40 + 34 36 01	208	-0.44
0028.0 + 3418	00 30 45 + 34 34 45	110	-0.93
0028.7 + 4923	00 31 27 + 49 40 23	-233	-1.10
0028.9 + 5337	00 31 43 + 53 54 01	-956	-0.85
0029.0 + 5332	00 31 52 + 53 49 07	-799	-0.65

Таблица 2. (Продолжение)

Имя WENSS, WNB	RA + Dec hh mm ss + dd mm ss	δT , 10^{-6}K	Sp.In.
(1)	(2)	(3)	(4)
0029.1 + 3744	00 31 50 + 38 01 03	431	-0.18
0029.6 + 4507	00 32 19 + 45 24 03	223	-0.16
0029.8 + 3605	00 32 33 + 36 22 12	-836	0.58
0030.3 + 3054	00 33 01 + 31 10 49	-684	-1.16
0030.5 + 3059	00 33 12 + 31 16 30	-799	0.37
0030.8 + 3721	00 33 30 + 37 37 40	-1180	-0.70
0030.8 + 3910	00 33 33 + 39 27 28	-939	-1.44
0030.9 + 4847	00 33 42 + 49 03 38	774	-0.09
0031.0 + 3049	00 33 44 + 31 05 46	-971	-1.18
0031.2 + 5254	00 34 01 + 53 11 18	-2138	-0.46
0031.3 + 3946	00 34 06 + 40 02 51	59	-0.45
0031.6 + 4139	00 34 22 + 41 55 57	-611	-0.95
0031.7 + 4019	00 34 29 + 40 35 54	-555	-0.85
0031.9 + 3507A ^s	00 34 36 + 35 23 53	-663	-0.45
0032.1 + 5116	00 34 53 + 51 33 22	-797	-0.49
0033.0 + 2933	00 35 40 + 29 49 45	-188	-1.01
0033.5 + 3029	00 36 10 + 30 45 33	-648	-0.79
0034.2 + 3530	00 36 56 + 35 46 37	202	-1.52
0034.2 + 4339	00 36 58 + 43 56 18	-603	-1.19
0034.3 + 3030	00 36 59 + 30 46 32	-916	-1.12
0034.5 + 3215A	00 37 09 + 32 30 41	-1292	-0.93
0034.5 + 3215	00 37 11 + 32 32 16	-1423	-0.98
0034.5 + 3418	00 37 16 + 34 34 52	1201	-0.64
0034.5 + 4400	00 37 16 + 44 17 26	-906	-0.66
0034.8 + 4526	00 37 33 + 45 43 08	-364	-0.81
0035.8 + 3012	00 38 30 + 30 28 58	-474	-0.98
0035.9 + 3701	00 38 38 + 37 18 05	-510	-1.09
0036.2 + 4138	00 38 57 + 41 54 40	-1512	-0.53
0036.2 + 4418	00 39 00 + 44 35 26	847	-1.10
0036.3 + 3221A	00 39 01 + 32 36 12	-862	-1.00
0036.3 + 3221B	00 39 09 + 32 39 42	-529	-1.14
0036.4 + 3636	00 39 06 + 36 52 54	-1223	-0.33
0036.7 + 3216	00 39 24 + 32 32 44	-730	-1.06
0036.7 + 4320	00 39 29 + 43 36 51	-698	-0.64
0036.9 + 4138	00 39 40 + 41 55 07	-406	-0.81
0037.5 + 4640	00 40 18 + 46 57 15	-685	-0.91
0037.7 + 3539	00 40 28 + 35 56 11	505	-0.91
0037.7 + 3805	00 40 26 + 38 21 32	-94	-0.82
0037.9 + 4157	00 40 44 + 42 13 31	-658	-0.79
0038.2 + 3310	00 40 56 + 33 26 32	-32	-0.71
0038.6 + 3802	00 41 19 + 38 19 03	-128	-0.87
0039.3 + 3642A ^s	00 41 55 + 36 58 57	-1132	0.26
0039.3 + 3642 ^s	00 42 02 + 36 59 25	-1132	-0.93
0039.5 + 3218	00 42 16 + 32 34 47	-1035	-0.14

Таблица 2. (Продолжение)

Имя WENSS, WNB	RA + Dec hh mm ss + dd mm ss	δT , 10^{-6}K	Sp.In.
(1)	(2)	(3)	(4)
0039.6 + 3110	00 42 22 + 31 26 44	345	-1.34
0039.7 + 4814	00 42 31 + 48 31 15	-340	-0.81
0040.0 + 5720	00 42 53 + 57 36 38	-825	-0.83
0040.4 + 3315	00 43 08 + 33 31 57	-1179	-0.87
0040.7 + 3806	00 43 31 + 38 22 40	-105	0.45
0040.9 + 3452	00 43 39 + 35 09 13	-207	-0.42
0041.2 + 3346	00 43 59 + 34 03 03	-961	-1.02
0041.9 + 4732	00 44 47 + 47 48 31	-1123	-0.60
0042.1 + 3436	00 44 52 + 34 52 58	-23	-0.70
0042.1 + 4732	00 44 58 + 47 48 42	-1123	-0.63
0042.6 + 4653	00 45 28 + 47 09 25	-181	-0.53
0042.9 + 4657	00 45 42 + 47 14 12	205	-0.63
0042.9 + 5111	00 45 49 + 51 28 21	-387	-0.80
0043.3 + 4444	00 46 06 + 45 01 13	-2875	-0.74
0043.6 + 3104	00 46 20 + 31 21 16	-405	-0.25
0043.8 + 3453	00 46 31 + 35 10 06	-272	0.23
0044.0 + 4902	00 46 53 + 49 19 06	-2242	-1.16
0044.1 + 3811 ^s	00 46 53 + 38 27 31	-1695	-0.79
0044.4 + 3901	00 47 12 + 39 18 18	-447	-0.68
0044.4 + 4908	00 47 17 + 49 25 11	-2380	-0.35
0044.6 + 7431	00 48 03 + 74 47 41	-860	-1.16
0044.7 + 3358	00 47 30 + 34 14 32	-1324	-1.68
0044.7 + 3858	00 47 30 + 39 15 13	-629	-0.34
0044.9 + 3011	00 47 37 + 30 28 00	90	-0.51
0045.2 + 5258	00 48 06 + 53 14 43	550	-0.64
0045.4 + 3356	00 48 08 + 34 13 07	-1203	-0.59
0045.5 + 3247	00 48 16 + 33 04 03	68	-0.12
0045.6 + 7437	00 49 04 + 74 54 03	-717	-0.97
0045.8 + 3958 ^s	00 48 36 + 40 14 25	-602	-0.51
0046.7 + 3532	00 49 30 + 35 49 09	-810	-0.59
0047.0 + 4038	00 49 48 + 40 54 22	307	-0.68
0047.2 + 3222	00 49 57 + 32 38 50	-301	0.05
0047.2 + 3445	00 49 59 + 35 01 59	-976	-0.37
0047.8 + 3314	00 50 35 + 33 30 20	-517	-0.67
0047.9 + 3756	00 50 45 + 38 13 13	-1177	-0.88
0048.0 + 5802	00 50 59 + 58 19 07	-153	-1.30
0049.0 + 3253	00 51 49 + 33 09 51	-36	-0.63
0049.0 + 3630	00 51 45 + 36 47 13	-696	-0.59
0049.4 + 4217	00 52 16 + 42 33 26	813	-1.03
0049.5 + 3836A	00 52 12 + 38 51 54	-1085	0.18
0049.5 + 3836B	00 52 19 + 38 53 07	-1093	-0.75
0049.7 + 4801	00 52 35 + 48 17 38	-2034	-0.55
0049.8 + 5355	00 52 42 + 54 11 57	-204	-0.06
0050.3 + 4731	00 53 09 + 47 48 00	-1037	0.20

Таблица 2. (Продолжение)

Имя WENSS, WNB	RA + Dec hh mm ss + dd mm ss	δT , 10^{-6}K	Sp.In.
(1)	(2)	(3)	(4)
0050.6 + 2921	00 53 24 + 29 37 35	-846	-1.28
0050.9 + 4039	00 53 42 + 40 55 29	-1148	-0.53
0053.6 + 3544	00 56 26 + 36 00 20	-1253	-1.19
0054.6 + 5034	00 57 31 + 50 50 19	358	-0.38
0056.3 + 4705	00 59 13 + 47 21 41	-2511	-1.34
0056.4 + 3748	00 59 13 + 38 04 29	-356	-0.04
0056.4 + 3804	00 59 16 + 38 20 13	-13	0.74
0057.4 + 7437	01 01 01 + 74 53 14	-1104	-0.70
0057.5 + 3459	01 00 20 + 35 15 21	-886	-1.71
0057.6 + 5257	01 00 36 + 53 13 60	-1418	0.77
0057.7 + 4835	01 00 40 + 48 51 37	-2005	0.09
0057.9 + 7440	01 01 34 + 74 57 03	-1382	-0.61
0058.5 + 4439	01 01 24 + 44 55 19	-1253	-0.68
0058.7 + 3846	01 01 33 + 39 02 23	32	-0.18
0059.1 + 3129B	01 01 55 + 31 46 05	-1158	-0.98
0059.1 + 5601	01 02 09 + 56 17 59	-3200	-0.83
0059.7 + 3459	01 02 33 + 35 15 26	-83	-0.90
0059.8 + 4624	01 02 42 + 46 40 10	-440	-0.32
0059.8 + 7518	01 03 34 + 75 34 53	-916	-1.05
0100.1 + 4557	01 02 59 + 46 13 21	-189	-1.27
0100.2 + 5416	01 03 16 + 54 32 54	-1810	-0.37
0100.3 + 3739	01 03 11 + 37 55 42	-1578	0.20
0101.0 + 3310	01 03 50 + 33 27 01	-617	-1.53
0101.2 + 3130	01 03 60 + 31 46 34	-1073	-1.19
0102.0 + 4638	01 04 55 + 46 54 25	-241	0.21
0102.9 + 3113	01 05 43 + 31 30 02	-542	-0.77
0103.0 + 3107	01 05 51 + 31 23 55	-1050	-1.05
0103.9 + 3628	01 06 43 + 36 44 11	723	-0.89
0104.1 + 4511	01 07 04 + 45 27 13	820	-0.36
0104.5 + 4900	01 07 27 + 49 16 17	-1029	-0.36
0104.6 + 3331	01 07 25 + 33 47 02	-405	-0.69
0105.7 + 3049	01 08 31 + 31 05 52	-767	-1.29
0105.8 + 4203	01 08 40 + 42 19 45	-1547	-0.62
0105.8 + 4500	01 08 45 + 45 16 23	1079	-1.44
0105.9 + 5019	01 08 52 + 50 35 31	-1200	-1.19
0107.3 + 4141 ^p	01 10 12 + 41 57 54	-900	-0.90
0108.6 + 4741	01 11 34 + 47 57 18	-498	-1.50
0108.8 + 3251	01 11 40 + 33 07 10	526	-0.91
0109.1 + 2934	01 11 52 + 29 50 44	-1956	-0.39
0109.4 + 3907	01 12 16 + 39 23 18	-812	-0.80
0109.5 + 4948	01 12 30 + 50 03 55	-1537	-0.94
0110.0 + 4626	01 13 00 + 46 42 18	-1163	-1.15
0110.4 + 4403	01 13 19 + 44 19 03	161	-0.94
0110.4 + 5055	01 13 26 + 51 11 30	827	-1.07

Таблица 2. (Продолжение)

Имя WENSS, WNB	RA + Dec hh mm ss + dd mm ss	δT , 10^{-6}K	Sp.In.
(1)	(2)	(3)	(4)
0112.2 + 6057	01 15 26 + 61 13 15	-500	-0.64
0113.5 + 3050	01 16 19 + 31 06 33	-1036	-0.88
0115.1 + 3936	01 18 01 + 39 52 02	-662	-0.96
0115.5 + 2953	01 18 17 + 30 08 53	-227	-1.20
0115.6 + 4904	01 18 40 + 49 19 52	-558	-0.32
0115.8 + 4415	01 18 46 + 44 30 60	-323	-0.95
0116.3 + 5015	01 19 20 + 50 31 04	-332	-0.46
0116.7 + 4008	01 19 37 + 40 24 00	-484	-0.40
0117.1 + 3332	01 19 56 + 33 48 09	-388	-0.96
0117.2 + 4848	01 20 13 + 49 03 56	-1595	-0.41
0117.2 + 5216 ^p	01 20 21 + 52 32 15	-587	-0.91
0117.6 + 3753	01 20 28 + 38 09 30	13	-0.98
0117.6 + 4841	01 20 41 + 48 57 35	-1742	-0.83
0117.9 + 3919	01 20 47 + 39 35 33	-413	-0.91
0118.4 + 5629	01 21 36 + 56 44 44	-259	-0.72
0118.5 + 4803A	01 21 28 + 48 18 45	-1445	-0.87
0118.5 + 4803B	01 21 34 + 48 18 53	-900	-1.26
0118.6 + 4503	01 21 36 + 45 19 08	-1520	-1.33
0119.0 + 4508	01 22 01 + 45 23 51	-2283	-0.03
0120.4 + 3046	01 23 12 + 31 02 19	647	-0.06
0120.5 + 4335	01 23 30 + 43 51 30	-1684	-0.70
0120.9 + 3738	01 23 49 + 37 53 60	-1352	-0.33
0121.1 + 3626	01 23 59 + 36 41 53	-1975	-0.10
0121.1 + 3713	01 24 01 + 37 28 57	239	-1.42
0122.3 + 3256 ^s	01 25 11 + 33 11 57	-1776	-0.40
0122.3 + 3655	01 25 12 + 37 11 04	-414	-0.09
0122.5 + 3955 ^p	01 25 25 + 40 11 28	1138	0.23
0123.0 + 4240	01 26 01 + 42 56 22	463	-0.92
0123.2 + 5028	01 26 21 + 50 43 40	165	0.19
0124.0 + 3232 ^s	01 26 51 + 32 48 06	-1430	-0.83
0124.7 + 7158	01 28 37 + 72 14 27	-823	-1.21
0125.7 + 3109	01 28 37 + 31 24 49	-491	-0.27
0126.0 + 2902	01 28 50 + 29 17 59	-1983	-0.95
0126.2 + 3542 ^p	01 29 08 + 35 58 06	-1893	-0.71
0127.1 + 3616	01 30 01 + 36 31 36	248	0.20
0127.1 + 4117	01 30 05 + 41 32 35	-1506	-1.14
0127.9 + 4047	01 30 54 + 41 03 23	-817	-0.53
0128.4 + 4321	01 31 24 + 43 37 07	-87	-1.09
0129.0 + 4804 ^s	01 32 07 + 48 20 14	-2118	-0.43
0129.1 + 4330	01 32 06 + 43 45 35	-913	-0.37
0130.2 + 3404	01 33 09 + 34 20 08	-883	-0.90
0131.2 + 7049	01 35 04 + 71 04 56	-353	-0.82
0132.0 + 4036	01 34 60 + 40 52 05	499	-0.71
0132.5 + 4058	01 35 32 + 41 14 15	-466	-0.51

Таблица 2. (Продолжение)

Имя WENSS, WNB	RA + Dec hh mm ss + dd mm ss	δT , 10^{-6}K	Sp.In.
(1)	(2)	(3)	(4)
0132.6 + 2948 ^s	01 35 30 + 30 03 55	-897	-0.05
0133.5 + 4137	01 36 33 + 41 52 39	-802	-0.56
0134.0 + 2959	01 36 54 + 30 14 32	-991	-1.03
0134.8 + 3729	01 37 47 + 37 44 23	-1919	0.56
0135.0 + 4413	01 38 02 + 44 28 56	-967	-1.01
0135.4 + 4403	01 38 27 + 44 18 39	232	-1.63
0136.9 + 3343 ^s	01 39 49 + 33 58 39	-1594	-1.34
0137.3 + 5149	01 40 28 + 52 04 44	-90	-1.19
0137.7 + 3534	01 40 40 + 35 49 39	-1961	-1.16
0137.7 + 7353	01 41 60 + 74 08 47	-2762	-0.23
0139.3 + 4144	01 42 22 + 41 59 14	-697	-0.17
0139.6 + 4236	01 42 38 + 42 51 42	-61	-1.32
0139.9 + 4421	01 42 56 + 44 36 58	-312	-1.58
0140.2 + 5158	01 43 25 + 52 13 16	-559	-1.24
0140.3 + 4144	01 43 17 + 41 59 27	186	-0.98
0141.6 + 3235	01 44 32 + 32 50 57	-675	-1.03
0143.1 + 3644	01 46 06 + 36 59 13	-1818	-0.90
0143.1 + 4926	01 46 19 + 49 41 53	-550	-0.96
0143.3 + 3219	01 46 12 + 32 34 50	-1416	-0.41
0143.3 + 4551	01 46 27 + 46 06 19	-1407	-0.60
0143.4 + 4846	01 46 36 + 49 01 52	-1632	-1.49
0143.5 + 4154	01 46 34 + 42 09 16	745	-0.50
0143.9 + 3641	01 46 56 + 36 56 46	-1818	-0.60
0143.9 + 4555	01 47 02 + 46 09 58	-1599	-0.69
0143.9 + 5506	01 47 15 + 55 21 27	-980	-0.88
0144.0 + 3646	01 47 01 + 37 01 36	-2056	-1.01
0144.1 + 5503	01 47 28 + 55 18 48	-972	0.05
0144.8 + 7026	01 48 51 + 70 41 16	-198	-1.95
0145.2 + 5001	01 48 23 + 50 16 26	-711	-0.87
0145.9 + 4006	01 48 58 + 40 21 35	-1025	0.43
0146.3 + 3248A	01 49 13 + 33 05 34	219	-1.26
0146.3 + 3248B	01 49 16 + 33 02 51	49	-0.71
0150.2 + 3104	01 53 07 + 31 18 48	-756	-0.64
0150.4 + 2920	01 53 20 + 29 35 43	579	-0.49
0150.4 + 3124	01 53 22 + 31 39 25	-1384	-0.82
0150.9 + 4148	01 53 60 + 42 03 07	-545	-0.84
0151.4 + 4857	01 54 39 + 49 11 55	-1997	-1.27
0152.1 + 4938	01 55 18 + 49 53 05	922	-0.49
0152.3 + 4707	01 55 29 + 47 22 04	-1190	-1.01
0152.3 + 6508	01 56 07 + 65 22 60	-1671	-0.94
0153.0 + 3224	01 55 55 + 32 39 16	-82	-0.19
0153.5 + 3100	01 56 24 + 31 14 52	-223	-1.22
0153.8 + 3212	01 56 44 + 32 27 30	-450	-0.53
0154.4 + 4210	01 57 32 + 42 24 49	-188	-0.64

Таблица 2. (Продолжение)

Имя WENSS, WNB	RA + Dec hh mm ss + dd mm ss	δT , 10^{-6}K	Sp.In.
(1)	(2)	(3)	(4)
0155.3 + 4342	01 58 26 + 43 57 28	147	-0.78
0156.1 + 3103	01 59 01 + 31 18 11	-127	-0.42
0157.0 + 3537	02 00 02 + 35 52 28	407	-0.44
0157.1 + 5225	02 00 24 + 52 40 21	-330	-0.57
0157.1 + 5338	02 00 29 + 53 52 55	803	-1.76
0157.3 + 5227	02 00 40 + 52 42 13	-396	-1.52
0158.0 + 3131	02 00 56 + 31 46 15	-622	-1.09
0158.1 + 3513	02 01 09 + 35 28 15	-287	-0.97
0158.2 + 3138	02 01 07 + 31 52 49	-831	-0.18
0158.4 + 3715	02 01 28 + 37 30 01	-190	-0.86
0158.6 + 3137	02 01 36 + 31 51 32	-709	-0.51
0158.6 + 3510	02 01 36 + 35 24 46	-190	-0.80
0159.0 + 4311	02 02 11 + 43 25 33	-123	-0.64
0159.1 + 3822	02 02 10 + 38 36 60	-718	-1.33
0159.7 + 2915	02 02 37 + 29 30 02	-977	-1.26
0159.7 + 3833A	02 02 45 + 38 47 14	-190	-1.07
0159.7 + 3833B	02 02 47 + 38 50 07	-100	-0.29
0159.7 + 4113	02 02 47 + 41 27 52	-1119	-0.97
0159.8 + 3741	02 02 53 + 37 56 19	-514	-0.20
0159.9 + 3838	02 02 56 + 38 52 38	210	-0.52

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, можно отметить, что проблема неполноты каталогов решается при помощи новых алгоритмов и программ, чувствительных к топологическим, статистическим и спектральным характеристикам многочастотных карт космических миссий.

В данной работе для поиска новых СЗ-объектов мы применили естественный подход, основанный на соотношении сигналов в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах, но в направлении на радиоисточники, которые могут являться признаками существования скоплений галактик. Для анализа мы использовали данные по радиоисточникам каталога WENSS в диапазоне прямых восхождений $0^{\text{h}} \leq \alpha < 2^{\text{h}}$ и склонений $28^{\circ} < \delta < 76^{\circ}$ на эпоху каталога, содержащего астрометрическую (координаты) и астрофизическую (плотности потока на частоте 325 МГц) информацию, для 16 364 объектов.

После автоматической процедуры селекции потенциальных кандидатов были отобраны 1778 объектов (9.9% от общего списка), из которых с помощью визуальной инспекции был выделен 381 источник (2.1% от общего списка) с наиболее типичными признаками наличия эффекта. Любопытно отметить, что метод позволил обнаружить

21 из 28 источников Planck, которые вошли в соответствующий каталог миссии, а визуальный контроль, основанный на оценке контраста эффекта, оставил шесть из них. Отметим, что список объектов, не представленных в данной работе из-за «зашумленности» карты флуктуациями СМВ, содержится в дополнительном каталоге у авторов статьи. Предварительные оценки показывают, что количество объектов с эффектом Сюняева–Зельдовича при тщательном анализе карт микроволнового фона может возрасти до десятков тысяч, что в несколько раз превышает число объектов, полученное по отождествлениям с обзорами SDSS и WISE [42]. Важно отметить, что предложенный метод поиска скоплений галактик с СЗ-эффектом по радиоисточникам также сделает возможным поиск похожих объектов с большими красными смещениями ($z > 1$), которые не видны в [42] в силу селекционных эффектов.

Отобранные источники в дальнейшем могут быть использованы для оптического исследования окружения, оценок массы и других космологических свойств для проверок следствий стандартной космологической модели. Кроме того, новые списки протяженных радиоисточников в микроволновом диапазоне дают новую информацию для учета при моделировании распределения протяженных

радиоисточников на полной сфере [43]. Исследования окружения радиоисточников каталога WENSS других диапазонов прямых восхождений, а также других радиоастрономических обзоров, продолжаются.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность рецензенту за полезные замечания, которые привели к коррекции текста и улучшению его понимания. Также 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 [44, 45]. В работе использованы система обработки радиоастрономических данных FADPS [39, 46] и пакет GLESP [34, 35, 47] для анализа протяженного излучения на сфере.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. C. L. Bennett, D. Larson, J. L. Weiland, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **208**, 20 (2013).
2. R. Adam et al. (Planck Collab.), *Astron. and Astrophys.* **594**, A1 (2016).
3. C. P. Ahn et al. (SDSS-III Collab.), *Astrophys. J. Suppl.* **203**, 21 (2012).
4. K. N. Abazajian, J. K. Adelman-McCarthy, M. A. Agüeros, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **182**, 543 (2009).
5. Y. B. Zeldovich and R. A. Sunyaev, *Astrophys. and Space Sci.* **4**, 301 (1969).
6. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), *Astron. and Astrophys.* **594**, A24 (2016).
7. K. Vanderlinde, T. M. Crawford, T. de Haan, et al., *Astrophys. J.* **722**, 1180 (2010).
8. M. Hasselfield, M. Hilton, T. A. Marriage, et al., *J. Cosmo. AstroPart. Phys.* **7**, 008 (2013).
9. G. Blumenthal and G. Miley, *Astron. and Astrophys.* **80**, 13 (1979).
10. M. L. Khabibullina and O. V. Verkhodanov, *Astrophysical Bulletin* **64**, 123 (2009).
11. O. V. Verkhodanov and Y. N. Parijskij, *Radio Galaxies and Cosmology* (Fizmatlit, Moscow, 2009) [in Russian].
12. Y. N. Parijskij, W. M. Goss, A. I. Kopylov, et al., *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **40**, 5 (1996).
13. C. De Breuck, W. van Breugel, H. J. A. Röttgering, and G. Miley, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **143**, 303 (2000).
14. B. P. Venemans, H. J. A. Röttgering, G. K. Miley, et al., *Astron. and Astrophys.* **461**, 823 (2007).
15. T. V. Keshelava and O. V. Verkhodanov, *Astrophysical Bulletin* **70**, 257 (2015).
16. R. B. Rengelink, Y. Tang, A. G. de Bruyn, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **124**, 259 (1997).
17. P. A. R. Ade et al. (Planck Collaboration), *Astron. and Astrophys.* **571**, A1 (2014).
18. P. A. R. Ade et al. (Planck Collaboration), *Astron. and Astrophys.* **594**, A26 (2016).
19. R. A. Sunyaev and Y. B. Zeldovich, *Comments Astrophysics Space Physics* **4**, 173 (1972).
20. R. A. Sunyaev and Y. B. Zeldovich, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **190**, 413 (1980).
21. K. K. Schaffer, T. M. Crawford, K. A. Aird, et al., *Astrophys. J.* **743**, 90 (2011).
22. P. A. R. Ade et al. (Planck Collaboration), *Astron. and Astrophys.* **571**, A21 (2014).
23. P. A. R. Ade et al. (Planck Collaboration), *Astron. and Astrophys.* **571**, A20 (2014).
24. O. V. Verkhodanov, E. K. Maiorova, O. P. Zhelenkova, et al., *Astronomy Reports* **60**, 630 (2016).
25. L. I. Gurvits, K. I. Kellermann, and S. Frey, *Astron. and Astrophys.* **342**, 378 (1999).
26. O. V. Verkhodanov, Y. N. Parijskij, and A. A. Starobinsky, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **58**, 5 (2005).
27. A. I. Kopylov, W. M. Goss, Y. N. Parijskij, et al., *Astronomy Letters* **32**, 433 (2006).
28. Y. N. Parijskij, P. Thomasson, A. I. Kopylov, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **439**, 2314 (2014).
29. O. V. Verkhodanov, D. I. Solovyov, O. S. Ulakhovich, and M. L. Khabibullina, *Astrophysical Bulletin* **71**, 139 (2016).
30. O. V. Verkhodanov, D. I. Solovyov, O. S. Ulakhovich, et al., *Astronomy Reports* **61**, 297 (2017).
31. E. Bertin and S. Arnouts, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **117**, 393 (1996).
32. P. D. Naselsky, P. R. Christensen, P. Coles, et al., *Astrophysical Bulletin* **65**, 101 (2010).
33. R. Adam et al. (Planck Collaboration), *Astron. and Astrophys.* **594**, A10 (2016).
34. A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov, et al., *Intern. J. Modern Physics D* **14**, 275 (2005).
35. O. V. Verkhodanov, A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, et al., *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **58**, 40 (2005).
36. R. J. Hanisch, A. Farris, E. W. Greisen, et al., *Astron. and Astrophys.* **376**, 359 (2001).
37. O. V. Verkhodanov, Y. V. Naiden, V. N. Chernenkov, and N. V. Verkhodanova, *Astrophysical Bulletin* **69**, 113 (2014).
38. O. V. Verkhodanov, in *Proc. 27th Radio Astronomical Conf. on Problems of Modern Radio Astronomy* (Inst. Appl. Astronomy RAS, St.-Petersburg, 1997), Vol. 1, p. 322 [in Russian].
39. O. V. Verkhodanov, *ASP Conf. Ser.* **125**, 46 (1997).
40. P. A. R. Ade et al. (Planck Collaboration), *Astron. and Astrophys.* **594**, A27 (2016).
41. Z. L. Wen, J. L. Han, and F. S. Liu, *Astrophys. J. Suppl.* **199**, 34 (2012).
42. R. A. Burenin, *Astronomy Letters* **43**, 507 (2017).
43. D. I. Solovyov and O. V. Verkhodanov, *Astrophysical Bulletin* **72**, 217 (2017).
44. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach, and V. N. Chernenkov, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **58**, 118 (2005).

45. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach, and V. N. Chernenkov, *Data Science J.* **8**, 34 (2009).
46. O. V. Verkhodanov, B. L. Erukhimov, M. L. Monosov, et al., *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **36**, 132 (1993).
47. A. G. Doroshkevich, O. V. Verkhodanov, P. D. Naselsky, et al., *Intern. J. Modern Physics D* **20**, 1053 (2011).

Search for Candidate Objects with the Sunyaev–Zeldovich Effect in the Radio Source Vicinities

O. V. Verkhodanov, N. V. Verkhodanova, O. S. Ulakhovich, D. I. Soloviev, and M. L. Khabibullina

Based on the data from the Westerbork Northern Sky Survey performed at a frequency of 325 MHz in the range of right ascensions $0^{\text{h}} \leq \alpha < 2^{\text{h}}$ and declinations $29^{\circ} < \delta < 78^{\circ}$ and using multi-frequency Planck maps, we selected candidate objects with the Sunyaev–Zeldovich effect. The list of the most probable candidates includes 381 sources. It is shown that the search for such objects can be accelerated by using a priori data on the negative level of fluctuations in the CMB map with remote low multipoles in the direction to radio sources.

Keywords: *radio continuum: galaxies—cosmic background radiation*