

СРАВНЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ СВОЙСТВ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ МИКРОВОЛНОВОГО ФОНА НА МНОГОЧАСТОТНЫХ КАРТАХ PLANCK ВБЛИЗИ ИСТОЧНИКОВ RCR-КАТАЛОГА СО СПЕКТРАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ ИСТОЧНИКОВ КАТАЛОГОВ NVSS И PLANCK

© 2022 Е. К. Майорова^{1*}, О. П. Желенкова¹

¹ Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 21 июля 2021 года; после доработки 26 октября 2021 года; принята к публикации 01 ноября 2021 года

Продолжено изучение связи положительных флуктуаций на частотных картах Planck с ближайшими радиоисточниками каталога RCR (RATAN Cold Refined). Обнаружена линейная корреляция между спектральными индексами радиоисточников на частотах 1.4 и 3.94 ГГц и спектральными индексами ближайших пятен в частотном диапазоне 30–217 ГГц. Проведено сравнение спектральных индексов NVSS-источников в диапазоне 150 МГц–3.94 ГГц со спектральными индексами ближайших объектов каталога Planck в диапазоне 30–217 ГГц, между которыми также обнаружена линейная корреляция. Зависимости между спектральными индексами RCR-источников и спектральными индексами пятен и зависимости между спектральными индексами NVSS-источников и объектами каталога Planck оказались идентичны. Различия в тангенсах углов наклона аппроксимирующих прямых этих зависимостей составили от 8 до 21%. Построены совмещенные спектры для RCR-источников и ближайших положительных пятен, а также для NVSS-источников и ближайших объектов каталога Planck. Показано, что часть пятен, обнаруженных вблизи RCR-объектов, с большой вероятностью являются их проявлениями в субмиллиметровом диапазоне. У более многочисленной группы пятен, плотности потоков которых превышают плотности потоков радиоисточников, экстраполированных в микроволновую область спектра, эти расхождения могут быть связаны с неточностью калибровок или случайным совпадением их координат. Однако более детальное изучение совмещенных спектров NVSS- и Planck-источников в диапазоне 70 МГц–857 ГГц показало, что форма спектров RCR-объектов и близлежащих пятен может быть объяснена переменностью радиоисточников. Построен спектр усредненных температур горячих пятен, обнаруженных вблизи RCR-источников, который продемонстрировал количественное превышение над полученными ранее с помощью моделирования, что можно объяснить влиянием синхротронного фона или вкладом радиоисточников или их родительских галактик в излучение в субмиллиметровом диапазоне. Вид полученного спектра свидетельствует в пользу того, что большинство пятен имеет внегалактическую природу. Полученная статистика спектральных индексов подтверждает связь радиоисточников с ближайшими положительными пятнами на частотных картах Planck. Полагаем, что вклад неучтенных радиоисточников в фон переднего плана может влиять на результирующую карту космологического микроволнового фона.

Ключевые слова: радиоконтинуум: общее — каталоги

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе мы продолжаем изучение связи положительных флуктуаций (горячих пятен) на частотных картах Planck с ближайшими радиоисточниками каталога RCR (RATAN Cold Refined) (Soboleva et al. 2010). Отметим, что неоднородности положительного сигнала на частотных картах Planck в миллиметровом и субмиллиметровом

диапазонах были обнаружены как вблизи источников RCR-каталога (Majorova and Zhelenkova 2021, Verkhodanov et al. 2015; 2016a), так и вблизи GPS (Gigahertz-Peaked Spectrum) — объектов, наблюдавшихся на радиотелескопе RATAN-600 2006–2017 гг. (Sotnikova et al. 2019). Примеры таких флуктуаций (пятен) приводятся в работах Verkhodanov et al. (2015) (рис. 7) и (Majorova et al. 2020) (рис. 2–6). Было показано, что на картах, содержащих сигналы как частотных каналов, так и космического микроволнового фона

*E-mail: len@sao.ru

(Cosmic microwave background, CMB), на уровне менее 4σ регистрируется достаточно большое число положительных пиков, совпадающих с координатами как источников каталога RCR, так и GPS-объектов из списка Sotnikova et al. (2019), что подтверждает гипотезу о повышенной вероятности появления положительного отклика на картах микроволнового фона, если в исследуемой области присутствует радиоисточник (Ade et al. 2015).

Как известно, для экспериментов с высокой чувствительностью, каким является миссия Planck, главным ограничением при картографировании CMB является загрязнение его астрофизическими источниками, как галактическими, так и внегалактическими («foregrounds» — передним планом). Одновременно флуктуации CMB могут являться «шумом» при исследовании излучения астрофизических объектов на миллиметровых длинах волн. По этим причинам изучение связи положительных флуктуаций на частотных картах Planck с ближайшими радиоисточниками представляется весьма важной задачей. Особый интерес представляет исследование спектральных особенностей положительных пятен, обнаруженных в направлении на радиоисточники.

В настоящей работе, как и в работах Majorova and Zhelenkova (2021), Verkhodanov et al. (2015), мы рассматриваем радиоисточники каталога RCR (Soboleva et al. 2010, Zhelenkova et al. 2013), который является уточненной версией RC-каталога (RATAN Cold) (Pariiski et al. 1991, Parijskij et al. 1993), полученного по наблюдениям эксперимента «Холод» (Parijskij and Korol'kov 1986)¹. RCR-каталог покрывает диапазон $2^h \leq RA < 17^h$ (Majorova et al. 2015, Zhelenkova et al. 2017) на склонении $Dec_{2000} = 4^{\circ}59' \pm 20'$ и включает 830 источников с плотностью потока выше 5 мЯн. Практически все источники, найденные в эксперименте «Холод», являются галактиками с активными ядрами (Active Galaxy Nucleus, AGN) и мощными источниками в радиодиапазоне (Zhelenkova et al. 2013)².

В работах Majorova and Zhelenkova (2021), Verkhodanov et al. (2015) были выполнены оценки плотностей потоков пятен, располагающихся вблизи RCR-объектов на картах Planck, и рассмотрены их статистические свойства. Majorova

and Zhelenkova (2021) оценили спектральные индексы пятен и показали, что в диапазоне 30–217 ГГц пятна, удаленные от RCR-источников в пределах ± 2.5 , имеют спектры, аналогичные спектру синхротронного излучения. Поскольку сами RCR-объекты излучают большую часть энергии посредством синхротронного механизма, было высказано предположение, что пятна могут быть проявлениями источников или их родительских галактик в субмиллиметровом диапазоне. Не исключалась также возможность того, что флуктуации на многочастотных картах являются остаточным вкладом фоновых галактических компонентов, к которым относится синхротронное излучение, свободно-свободное излучение и тепловое излучение пыли (Adam et al. 2016a). Отметим, что на частотах 353–857 ГГц некоторые из обнаруженных пятен имеют спектр, указывающий на их «пылевую» природу.

В настоящей работе мы представляем результаты поиска связи между спектральными индексами RCR-источников в диапазоне 100 МГц–8 ГГц и спектральными индексами ближайших к ним положительных пятен на картах Planck в диапазоне 30–217 ГГц для каждого отдельного источника. Ее наличие позволит понять, насколько обоснованно предположение о том, что пятна являются проявлениями ближайших источников или их родительских галактик.

Изучение распределения энергии в спектрах радиоисточников в различных частотных диапазонах являлось одной из важнейших задач с момента их первых отождествлений в оптическом диапазоне (Hey et al. 1948). На формирование континуального спектра влияют механизмы, связанные с активностью ядра галактики, выбросами струй и протяженными компонентами. Излучение в разных частотных диапазонах обусловлено также процессами, происходящими в окружающей среде, составом звездного населения родительской галактики, содержанием в ней пыли и газа. При этом важна оценка вклада каждого из компонентов в общее излучение радиоисточника.

Наиболее активные и продолжительные исследования распределения энергии в спектрах источников проводились сначала в радио и оптическом диапазонах. Позднее, когда стали доступны данные, полученные со спутником IRAS (от 12 до 100 мкм) (Neugebauer et al. 1984), и обзоров Akari (от 2 до 180 мкм) (Murakami et al. 2007) и WISE (от 3.4 до 22 мкм) (Wright et al. 2010), исследования осуществлялись в инфракрасном (ИК) диапазоне. Были проведены также более ранние, ограниченные по чувствительности, обзоры в ИК и микроволновом диапазонах на COBE (между 1.2 мкм и 1 см) (Voggeset et al. 1992) и сравнительно

¹ Эксперимент «Холод» проводился на радиотелескопе RATAN-600 в период 1980–1999 гг. на длинах волн 1.35, 2.08, 3.9, 7.6, 8.23 и 3.1 см. Основная длина волны 7.6 см (3.94 ГГц).

² При отождествлении использовались фотометрические и спектроскопические данные SDSS (Abazajian et al. 2009, Aihara et al. 2011, York et al. 2000) и базы данных VizieR, SIMBAD и NED.

недавние, выполненные в микроволновом диапазоне миссией WMAP (от 23 до 94 ГГц) (Bennett et al. 2003, de Zotti et al. 2010, Massardi et al. 2009, Wright et al. 2009) и миссией Planck (Ade et al. 2014a, Bennett et al. 2013).

Отдельно остановимся на результатах обзоров миссии Planck, поскольку они используются в настоящей работе. Наблюдения миссии проводились одновременно на девяти частотах в диапазоне 30–857 ГГц. Этот диапазон полностью перекрывает переход от источников, в которых доминирует синхротронный механизм излучения (отслеживание активных ядер галактик), к пылевым, где доминирует тепловое излучение пыли (отслеживание звездообразования). По результатам наблюдений миссии Planck были построены карты всего неба в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах, создан каталог внегалактических источников (Ade et al. 2014d), а также каталоги скоплений галактик и кандидатов в скопления (Ade et al. 2011c)³. Были исследованы источники разных популяций, измерены их параметры и статистические свойства (Ade et al. 2013; 2016b), изучены физические свойства скоплений галактик (Ade et al. 2016c), с высокой точностью оценены космологические параметры (Ade et al. 2014b; c)⁴.

В данной работе наряду с сопоставлением спектральных свойств RCR-источников и ближайших к ним пятен рассматриваются спектральные свойства радиисточников NVSS-каталога и ближайших к ним объектов каталогов Planck. Дополнительно остановимся на построении совмещенных спектров RCR-объектов и ближайших пятен, а также совмещенных спектров NVSS-источников и близких к ним объектов из каталогов Planck. Возможно, это поможет в понимании взаимосвязи между RCR-объектами и ближайшими к ним положительными пятнами на картах Planck.

Отметим, что спектральные свойства неоднородностей на многочастотных картах Planck рассматривались ранее в работе Pushkarev et al. (2019). Однако, в отличие от этой работы, где осуществлялась процедура стекинга — совмещение центров пятен и осреднение площадок вокруг них (Granett et al. 2008, Parijskij et al. 1996, Verkhodanov et al. 2016b), в настоящей статье мы оцениваем спектры только тех пятен на частотных картах Planck, которые располагаются вблизи источников RCR-каталога.

³Карты компонент микроволнового излучения трех релизов на всех частотах миссии, карты СМВ и все каталоги размещены в архиве PLA (Planck Legacy Archive) (<http://pla.esac.esa.int/pla/#home>).

⁴Основные результаты миссии представлены на сайте <https://www.cosmos.esa.int/web/planck/publications>.

В работе применялась система обработки радиоастрономических данных FADPS (Verkhodanov 1997, Verkhodanov et al. 1993).

2. СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ СПЕКТРАЛЬНЫМИ ИНДЕКСАМИ RCR-ИСТОЧНИКОВ НА ЧАСТОТАХ 3.94 ГГц И 1.4 ГГц И СПЕКТРАЛЬНЫМИ ИНДЕКСАМИ БЛИЖАЙШИХ ГОРЯЧИХ ПЯТЕН НА КАРТАХ PLANCK

2.1. Зависимости спектрального индекса α_{P1} от спектральных индексов $\alpha_{3.94}$ и $\alpha_{1.4}$

Для расчета спектральных индексов пятен α_{P1} использовались оценочные значения их плотностей потоков, полученные в работе Majorova and Zhelenkova (2021). Рассматривались пятна, центры которых удалены от RCR-источников на расстояния, не превышающие $2'5$ на частотах выше 100 ГГц и $3'–5'$ на частотах менее 70 ГГц. Полученные с помощью фотометрических измерений интегральной яркости пятен величины температур переводились затем в плотности потоков с помощью калибровочных кривых. Последние связывают плотности потоков источников (в Ян) с температурой микроволнового фона на картах Planck (в градусах Кельвина). Фотометрические измерения осуществлялись с помощью программы Source Extractor (SExtractor) (Bertin and Arnouts 1996)⁵. Подробно эта методика описана в работах Majorova and Zhelenkova (2021), Verkhodanov et al. (2015) 0.80 ± 0.07 , а величины плотностей потоков пятен приводятся в таблице 1 статьи Majorova and Zhelenkova (2021), которая опубликована в базе данных Vizier с идентификатором J/other/AstBu/76.109.

Применялся и другой способ оценки плотностей потоков пятен, обнаруженных вблизи RCR-источников — путем измерения максимальной амплитуды пятна. Амплитуда оценивалась относительно нулевого уровня по выделенной площадке на карте Planck, центр которой совпадал с координатами RCR-объекта. Размеры площадок варьировались в зависимости от частоты от $30' \times 30'$ до $1^\circ \times 1^\circ$. Термодинамические температуры пятен в максимуме T , а также величины среднеквадратичного отклонения флуктуаций шума по площадке σ_p определялись с помощью программы SExtractor. Расчет плотностей потоков пятен S проводился по формуле (Majorova and Zhelenkova 2021):

$$S(\text{mJy}) = S_{\nu}^{\text{min}}(\text{mJy}) * T(\text{mK}) / \sigma_p(\text{mK}) / 4, \quad (1)$$

⁵<http://www.astromatic.net/software/sextractor>, <http://terapix.iap.fr/soft/sextractor>

где S_{ν}^{\min} — величины минимальных плотностей потоков источников каталога Planck на частоте ν (Ade et al. 2014a), которые составляют порядка 4σ .

Второй способ оценки плотностей потоков не учитывает размеров пятен, которые могут отличаться от полуширины диаграммы направленности антенны (ДН) на заданной частоте, поэтому полученные величины S могут давать верхние или нижние границы плотностей потоков: на низких частотах ($\nu < 100$ ГГц) быть выше значений, полученных с помощью калибровочных кривых, на высоких ($\nu > 353$ ГГц) — ниже. Однако в частотном диапазоне $100 \leq \nu \leq 353$ ГГц размеры пятен в большинстве случаев соизмеримы с ДН, что делает такие оценки весьма информативными.

Расчет спектрального индекса α_{R1} осуществлялся с помощью программы `spg` (Verkhodanov et al. 2016a). Для пятен, у которых в спектре обнаружена пылевая составляющая, и спектр испытывает излом вблизи частоты 217 ГГц, оценки α_{R1} проводились отдельно в диапазонах 30–217 ГГц и 353–857 ГГц. В остальных случаях для расчета использовался весь диапазон от 30 до 857 ГГц.

В работе Majorova and Zhelenkova (2021) было показано, что медианные значения распределений спектральных индексов RCR-источников на частоте 3.94 ГГц ($\alpha_{3.94}$) и медианы распределений спектральных индексов пятен (α_{R1}) практически совпадают, близок и вид распределений, а также диапазон изменений спектральных индексов, что свидетельствует о том, что положительные флуктуации на частотных картах Planck, имеющие близкие с RCR-источниками координаты, в диапазоне 30–217 ГГц имеют синхротронную природу.

Распределения спектральных индексов α_{R1} , рассчитанные с использованием плотностей потоков пятен, полученных по формуле (1), оказываются более протяженными в сторону отрицательных значений по сравнению с распределениями спектральных индексов, рассчитанных с помощью калибровочных кривых. У первых медианные значения составляют -1.0 , у вторых — от -0.76 до -0.79 . Однако, несмотря на небольшие различия, они также подтверждают синхротронную природу положительных пиков, обнаруженных вблизи RCR-объектов в диапазоне частот 30–217 ГГц.

Для более детального рассмотрения взаимосвязи между спектральными индексами RCR-объектов и спектральными индексами ближайших положительных пятен были построены зависимости $\alpha_{\text{R1}} = f(\alpha_{3.94})$ и $\alpha_{\text{R1}} = f(\alpha_{1.4})$, где $\alpha_{1.4}$ — спектральный индекс RCR-источника на частоте 1.4 ГГц.

Следует отметить, что при расчете спектральных индексов RCR-объектов может возникать некоторая неоднозначность в аппроксимации их

спектров, а именно: в ряде случаев можно использовать как линейную, так и параболическую аппроксимацию. Особенно это касается источников, плотности потоков которых известны не более чем на трех частотах. Определенную роль может играть и субъективный фактор. Поэтому при построении зависимостей $\alpha_{\text{R1}} = f(\alpha_{3.94})$ и $\alpha_{\text{R1}} = f(\alpha_{1.4})$ использовались несколько наборов спектральных индексов RCR-объектов: полученные преимущественно с помощью линейной аппроксимации спектров, преимущественно с помощью параболической аппроксимации, а также независимо разными авторами.

На рис. 1 приведены зависимости $\alpha_{\text{R1}} = f(\alpha_{3.94})$ и $\alpha_{\text{R1}} = f(\alpha_{1.4})$, полученные путем оценок плотностей потоков пятен с помощью калибровочных кривых (панели (a), (b)) и с использованием плотностей потоков, рассчитанных по формуле (1) (панели (c), (d)). Там же показаны аппроксимирующие прямые: черной пунктирной линией — восходящей ветви, красной пунктирной — нисходящей. Для восходящей характерно увеличение спектрального индекса α_{R1} с увеличением спектральных индексов RCR-источников, для нисходящей — уменьшение α_{R1} с увеличением $\alpha_{3.94}$ и $\alpha_{1.4}$.

Как видно на графиках, зависимости, полученные с использованием плотностей потоков пятен, рассчитанных по формуле (1), имеют гораздо больший разброс точек, чем найденные с помощью калибровочных кривых. В первом приближении разность между их значениями можно рассматривать в качестве ошибок определения спектральных индексов пятен.

Ошибки спектральных индексов α_{R1} оценивались исходя из плотностей потоков пятен, определенных с помощью различных калибровочных кривых. Эти кривые были получены независимо разными авторами и при разном наборе калибраторов — компактных источников из каталога Planck (Majorova and Zhelenkova 2021). Величины ошибок оказались сопоставимы с $2\sigma_r$ и близки к случаю, когда плотности потоков на краях спектров составляли порядка ± 1.5 от их средних значений. Напомним, что σ_r — среднеквадратичное отклонение от среднего отношений плотностей потоков калибровочных источников к величинам плотностей потоков тех же источников, рассчитанных с помощью калибровочных кривых (Majorova and Zhelenkova 2021). Средние величины ошибок определения α_{R1} попадают в интервал от 0.9 ± 0.5 до 2.1 ± 1.2 . Величина 2.1 ± 1.2 соответствует варьированию плотностей потоков пятен на краях спектров вплоть до ± 1.8 .

Зависимости $\alpha_{\text{R1}} = f(\alpha_{3.94})$ с ошибками определения α_{R1} и $\alpha_{3.94}$ приведены на рис. 2. Средние величины ошибок определения спектральных

индексов $\alpha_{3.94}$ и $\alpha_{1.4}$ составили 0.04 ± 0.07 и 0.05 ± 0.06 соответственно.

Из графиков, приведенных на рис. 1 и 2 видно, что нисходящие ветви зависимостей $\alpha_{\text{PI}} = f(\alpha_{3.94})$ и $\alpha_{\text{PI}} = f(\alpha_{1.4})$ немногочисленны и составляют менее 5% от общего числа объектов, вблизи которых обнаружены пятна на частотных картах Planck. В основном это RCR-объекты с инверсионными спектрами или источники с максимумами в спектре. Как для источников, спектральные индексы которых лежат на восходящей ветви, так и для объектов на нисходящей ветви обнаруживается линейная корреляция между их спектральными индексами на частотах 1.4 и 3.94 ГГц и спектральными индексами пятен в диапазоне 30–217 ГГц.

В случае оценок плотностей потоков пятен с помощью калибровочных кривых величины коэффициента корреляции по Пирсону составили 0.75 ± 0.01 для восходящей и -0.90 ± 0.01 для нисходящей ветвей зависимости $\alpha_{\text{PI}} = f(\alpha_{3.94})$ и соответственно 0.67 ± 0.01 и -0.84 ± 0.02 для восходящей и нисходящей ветвей зависимости $\alpha_{\text{PI}} = f(\alpha_{1.4})$. При оценках плотностей потоков пятен с использованием формулы (1) величины коэффициентов корреляции существенно ниже: 0.50 ± 0.01 и -0.43 ± 0.06 для восходящей и нисходящей ветвей зависимости $\alpha_{\text{PI}} = f(\alpha_{3.94})$ и 0.51 ± 0.02 и -0.71 ± 0.03 зависимости $\alpha_{\text{PI}} = f(\alpha_{1.4})$.

Проведены аппроксимирующие прямые для обеих ветвей зависимостей. В дальнейшем основное внимание будет уделено восходящим ветвям, где сосредоточено большинство источников RCR, вблизи которых обнаружены пятна.

При аппроксимации спектров кривыми с наименьшим среднеквадратичным отклонением величина тангенса угла наклона β аппроксимирующей прямой восходящей ветви зависимости $\alpha_{\text{PI}} = f(\alpha_{3.94})$ составила 0.74 ± 0.09 , зависимости $\alpha_{\text{PI}} = f(\alpha_{1.4})$ — 0.83 ± 0.07 , нисходящей ветви соответственно -1.1 ± 0.05 и -0.95 ± 0.05 .

На величину наклона аппроксимирующих прямых зависимостей $\alpha_{\text{PI}} = f(\alpha_{3.94})$ и $\alpha_{\text{PI}} = f(\alpha_{1.4})$ влияет способ аппроксимации спектров RCR-объектов. Чем больше доля источников с линейной аппроксимацией, тем больше наклоны аппроксимирующих прямых. Кроме того, у источников с надежно определенными спектрами, для которых данные о плотностях потоков имеются более чем на трех частотах, тангенсы углов наклонов аппроксимирующих прямых уменьшаются примерно на 7% по сравнению с величинами, полученными для всей выборкой RCR-источников.

Спектральные индексы горячих пятен были также рассчитаны с использованием плотностей потоков только в диапазоне частот 100–217 ГГц и построены аналогичные зависимости. В этом диапазоне частотные карты Planck имеют более высокое (в 3–5 раз) разрешение, чем на частотах 30, 44 и 70 ГГц, а размеры пятен соизмеримы с диаграммой направленности телескопа на этих частотах. Наклон построенных аппроксимирующих прямых зависимостей $\alpha_{\text{PI}} = f(\alpha_{3.94})$ и $\alpha_{\text{PI}} = f(\alpha_{1.4})$ в этом диапазоне оказался круче, чем величины наклонов, полученные при использовании плотностей потоков в диапазоне 30–217 ГГц, что может свидетельствовать о тенденции к укрупнению спектров пятен с увеличением частоты.

Наклон аппроксимирующих прямых зависимостей, полученных с использованием плотностей потоков, вычисленных по формуле (1) оказался круче, чем наклон аппроксимирующих прямых зависимостей, полученных с помощью калибровочных кривых, однако эти различия лежат в пределах ошибок их определения.

2.2. Совмещенные спектры RCR-источников и ближайших к ним положительных пятен

Примеры спектров RCR-источников с нанесенными на тех же графиках плотностями потоков положительных пятен, обнаруженных в непосредственной близости от них на картах Planck (совмещенные спектры), показаны на рис. 3 и 4. При построении интегральных спектров RCR-источников были использованы данные каталогов NVSS (Condon et al. 1998), GLEAM (Hurley-Walker et al. 2017) и TGSS (Intema et al. 2017), VLSSr (Cohen et al. 2007, Lane et al. 2014) и GB6 (Gregory et al. 1996), включая оценки плотности потока по картам этих обзоров, а также вся имеющаяся информация о плотностях потоков в базах данных CATS⁶ (Verkhodanov et al. 2005), Vizier (Ochsenbein et al. 2000) и NED (NASA/IPAC Extragalactic Database). Исследование интегральных спектров источников каталога RCR было проведено в работе Zhelenkova and Majorova (2018).

По типу совмещенных спектров источники можно разделить на три группы. К первой группе относятся источники, у которых спектр ближайшего пятна является продолжением спектра источника. В основном подобные спектры наблюдается у ярких RCR-объектов, например, таких, как J0733+0456, J1145+0455, J1342+0504, J1424+0434, J1616+0459 (рис. 3).

⁶<https://www.sao.ru/cats>, https://www.sao.ru/cats/doc/CATS_descr.html

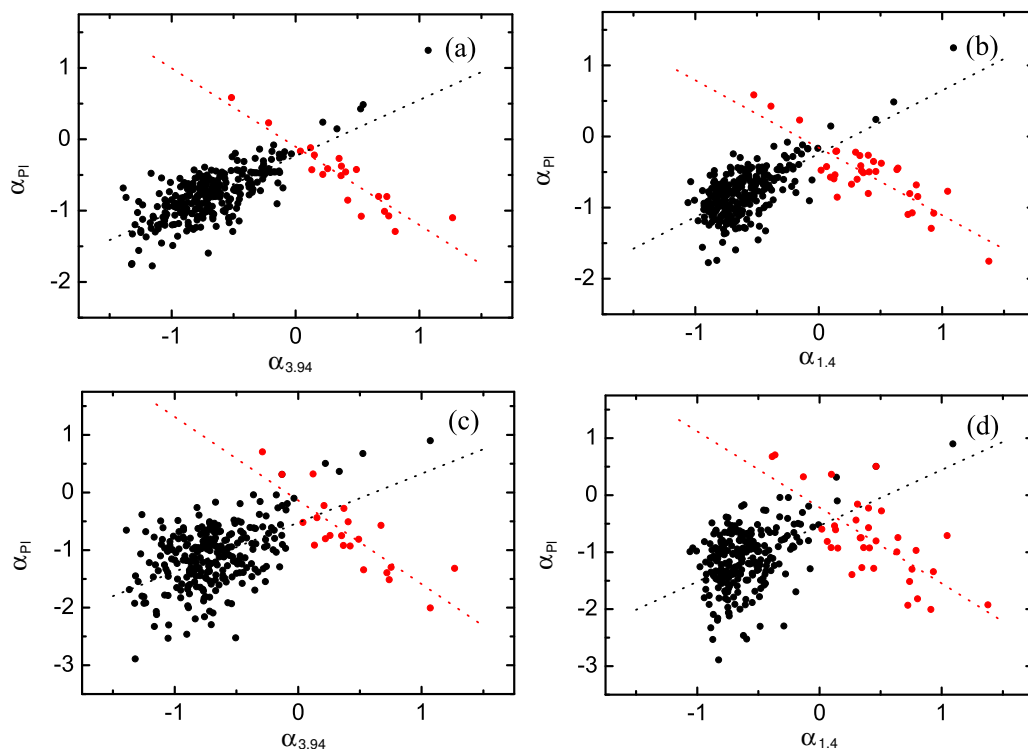


Рис. 1. Зависимости $\alpha_{PI} = f(\alpha_{3.94})$ и $\alpha_{PI} = f(\alpha_{1.4})$, полученные путем оценок плотностей потоков пятен с помощью калибровочных кривых (панели (a) и (b)) и с использованием плотностей потоков, которые оценивались по формуле (1) — (c) и (d) соответственно. Также показаны аппроксимирующие прямые: черной пунктирной линией — восходящей ветви, красной пунктирной — нисходящей.

Источник J161637+045932 из списка ярких High Frequency Peakers (HFP) объектов (Dallacasa et al. 2001) — квазар с красным смещением $z = 3.22$ и $m_r = 19^m3$, с максимумом в спектре на частоте около 5 ГГц. В работе Tinti and de Zotti (2006) его относят к блазарам. Для источников J1038+0512 и J1239+0443 (рис. 3) имеются данные о плотностях потоков в каталоге Planck, с которыми, как можно видеть на рисунках, наши оценки неплохо согласуются.

У второй, более многочисленной, группы спектральные индексы пятна и источника близки по величине, но плотности потоков пятен оказываются выше плотностей потоков источников, экстраполированных в микроволновую область спектра. В качестве примера на рис. 4 приведены спектры источников J0406+0447, J0736+450, J0749+0438, J1031+0443, J1052+0457. Источники J0807+0432 и J1521+0430 с некоторыми допущениями также можно отнести к первой группе. В работе Dallacasa et al. (1998) GPS-радиоисточник J1521+0430, известный также как 4C+04.51, отождествлен с галактикой ($z = 1.3$) с компактной двойной структурой на масштабах килопарсека. В статье Stanghellini et al. (2005) он отнесен к квазарам. Максимум в спектре находится на частоте 1 ГГц, звездная величина $m_r = 21^m2$.

К третьей группе мы отнесли те источники, которые в диапазоне 100 МГц–8 ГГц имеют инверсионные спектры и располагаются на нисходящих ветвях зависимостей $\alpha_{PI} = f(\alpha_{3.94})$ и $\alpha_{PI} = f(\alpha_{1.4})$. Спектры таких источников, совмещенные со спектрами близлежащих пятен, имеют максимум на частотах выше 8 ГГц и аналогичны спектрам HFP-объектов (Dallacasa et al. 2001, Fanti et al. 1985). Один из примеров — источник J1511+0518 (рис. 3), который имеет максимум на частоте около 12 ГГц с плотностью потока 1 Ян и является источником типа HFP. Это близкая яркая ($m_r = 16^m3$) галактика с красным смещением $z = 0.08$. Плотности потоков ближайших к нему пятен на картах Planck на частотах 44 и 100 ГГц, полученные с помощью описанной методики, хорошо легли на спектр этого источника. Еще один пример — источник J0813+0457 (рис. 4), вблизи которого имеются положительные пятна на картах Planck на частотах 30, 44, 70, 143 и 100 ГГц. Это достаточно слабый объект с плотностями потоков 2.6 мЯн на 1.4 ГГц и 15 мЯн на 3.94 ГГц, который может быть потенциальным кандидатом в HFP.

Считается, что источники с максимумом в спектре — это либо молодые радиоисточники, либо блазары (O’Dea 1998, Tinti et al. 2005, Tinti and de

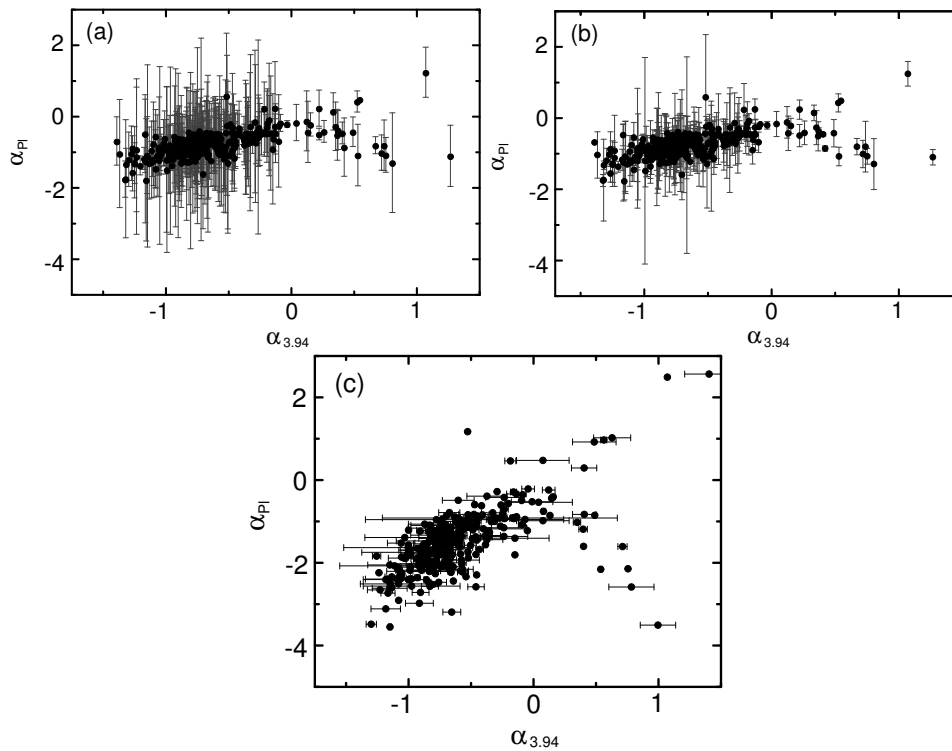


Рис. 2. Зависимости $\alpha_{PI} = f(\alpha_{3.94})$: (a) — ошибки α_{PI} , полученные из оценок определения плотностей потоков с помощью различных калибровочных кривых; (b) — ошибки α_{PI} , определенные как разность между значениями спектральных индексов, полученными с помощью калибровочных кривых и рассчитанными по формуле (1), (c) — указаны ошибки определения спектрального индекса $\alpha_{3.94}$.

Zotti 2006). Часть из них имеет спектры, образованные наложением степенного спектра на низких частотах на спектр с самопоглощением на частотах от 0.5 до 12 ГГц.

Если для источников первой группы вероятность того, что ближайшие положительные пятна на картах Planck связаны с этими объектами, достаточно велика, то связь источников второй и третьей групп, особенно слабых, с ближайшими пятнами не столь очевидна. Чтобы объяснить поведение совмещенных спектров источников второй группы, можно высказать несколько предположений:

- 1) превышение плотностей потоков пятен над экстраполированными в микроволновую область спектра плотностями потоков ближайших RCR-источников связано с недостаточной точностью калибровочных кривых;
- 2) источники и ближайшие пятна не связаны между собой, и имеет место случайное совпадение их координат;
- 3) пятна представляют собой положительные флуктуации шума или являются проявлениями фонового синхротронного излучения;
- 4) в некоторых случаях такой вид спектра может свидетельствовать о переменности источника.

Для проверки высказанных предположений рассмотрим, как ведут себя спектры NVSS-источников и ближайших к ним объектов из каталога Planck, температуры которых на частотных картах Planck превышают 4σ и плотности их потоков определены достаточно надежно.

3. СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ СПЕКТРАЛЬНЫМИ ИНДЕКСАМИ NVSS-ИСТОЧНИКОВ НА ЧАСТОТАХ 3.94 ГГц И 1.4 ГГц И СПЕКТРАЛЬНЫМИ ИНДЕКСАМИ ИСТОЧНИКОВ КАТАЛОГА PLANCK

По аналогии с зависимостями, полученными для RCR-источников, были построены зависимости $\alpha_{PI} = f(\alpha_{1.4})$ и $\alpha_{PI} = f(\alpha_{3.94})$ для источников NVSS-каталога и объектов каталога Planck, удаленных от них не более чем на $1'.5$. α_{PI} — спектральный индекс источника каталога Planck в диапазоне 30–217 ГГц, $\alpha_{3.94}$ и $\alpha_{1.4}$ — спектральные индексы NVSS-объектов на частотах 3.94 и 1.4 ГГц. Для анализа была подготовлена выборка из порядка 500 объектов каталогов NVSS и Planck (выборка NVSS–Planck), что сопоставимо с числом RCR-объектов, вблизи которых были обнаружены горячие пятна на картах Planck на двух или более частотных картах.

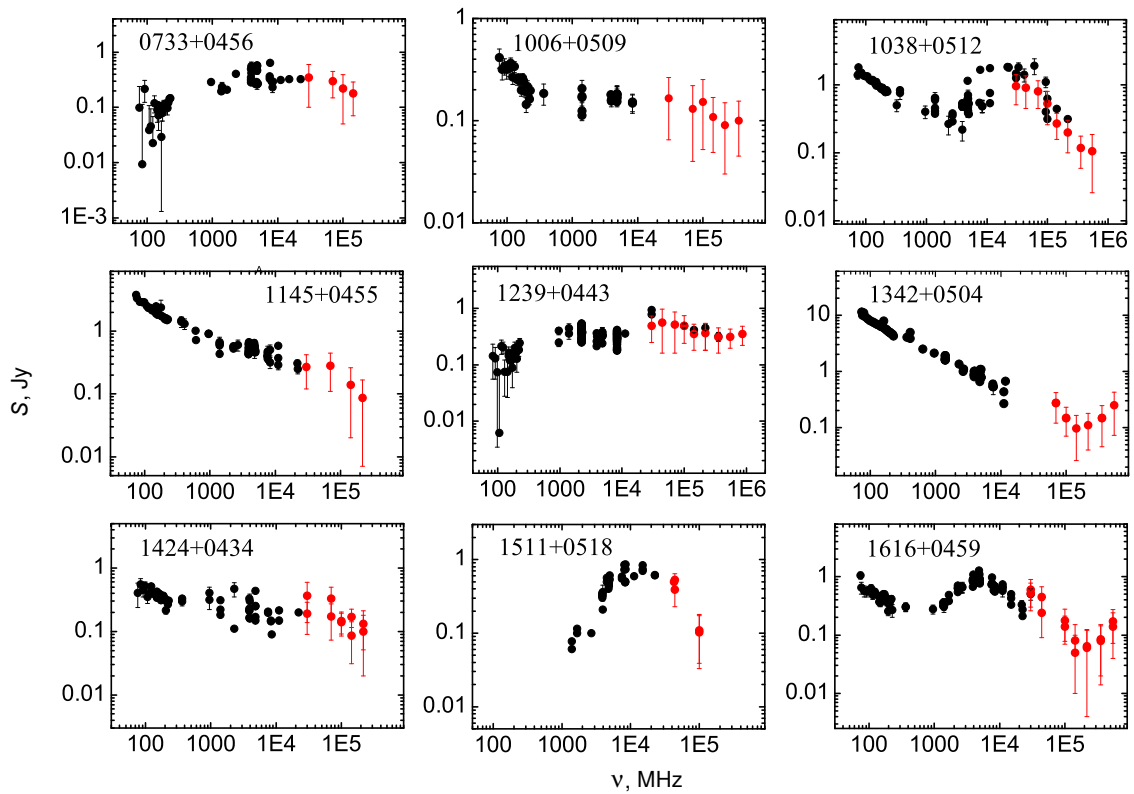


Рис. 3. Совмещенные спектры RCR-источников и ближайших к ним положительных пятен на картах Planck преимущественно для объектов первой группы. Заполненными черными кружками обозначены плотности потоков RCR-объектов из имеющихся каталогов, красными заполненными кружками — оценочные величины плотностей потоков пятен.

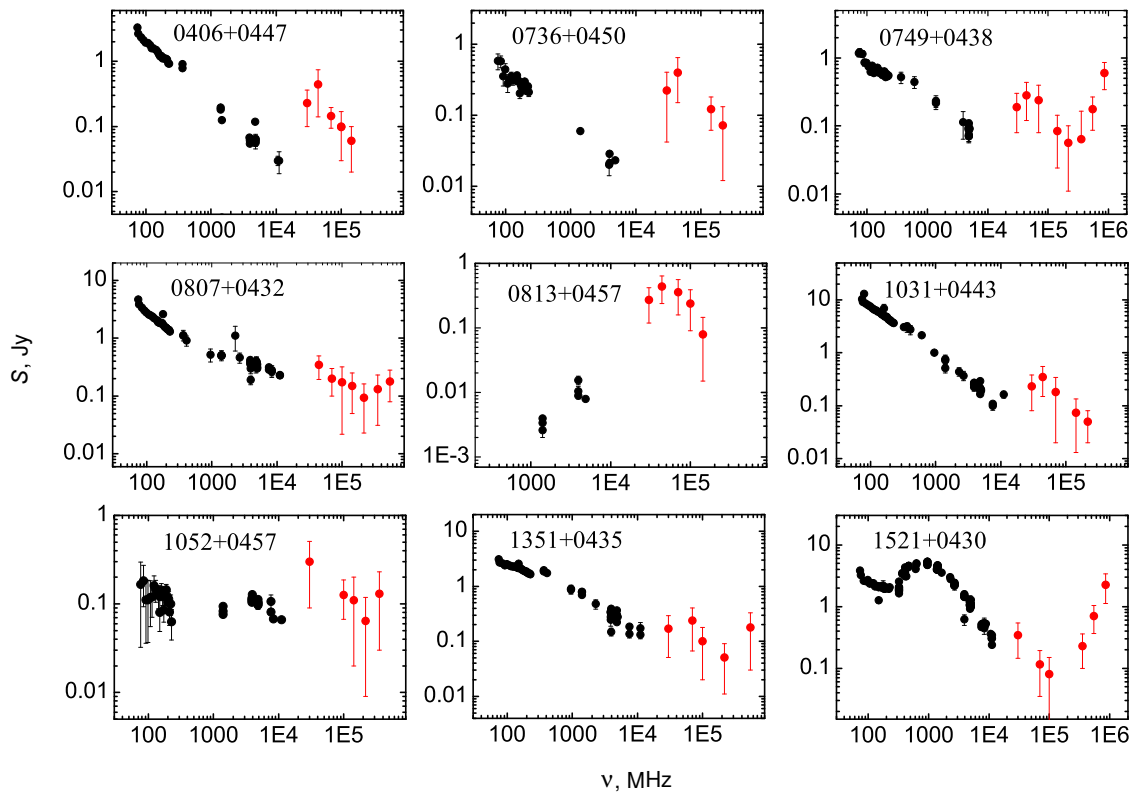


Рис. 4. То же, что и на рис. 3, в основном для объектов второй группы.

При построении спектров NVSS-источников использовались данные каталогов NVSS (1.4 ГГц) (Condon et al. 1998), TGSS (150 МГц) (Intema et al. 2017) и GB6 (4.85 ГГц) (Gregory et al. 1996). При вычислении спектральных индексов $\alpha_{3.94}$ и $\alpha_{1.4}$ применялась линейная аппроксимация. Для проверки поведения спектров на частотах выше 5 ГГц привлекались данные каталога CLASS (8.4 ГГц) (Myers et al. 2003). Построение спектров и вычисление спектральных индексов для объектов нашей выборки проводилось с использованием данных первой версии каталога Planck (PCCS1) (Ade et al. 2014d) и многочастотного каталога нетепловых источников Planck (PCNT) (Akrami et al. 2018).

На рис. 5 приведены зависимости $\alpha_{P1} = f(\alpha_{1.4})$, построенные на основе данных о плотностях потоков около 450 объектов каталогов Planck и NVSS.

На графиках рис. 5 не представлены NVSS-источники со спектральными индексами, близкими к нулю ($-0.2 < \alpha_{1.4} < 0.2$), около которых располагаются объекты каталога Planck со спектральными индексами, лежащими в диапазоне $-1.5 < \alpha_{P1} < -0.2$. Эти источники демонстрируют характерный излом в спектре на частотах около 10 ГГц, как, например, у объекта J0710+4732 (рис. 6). Доля таких источников составила порядка 9% от общего числа объектов выборки.

Сравнивая ход зависимостей на рис. 5 с приведенными на рис. 1, можно отметить их идентичность, за исключением бóльшего числа объектов на нисходящей ветви. Так же, как и в случае RCR-источников и ближайших к ним пятен, наблюдается линейная корреляция между спектральными индексами NVSS-источников на частотах 3.94 ГГц и 1.4 ГГц и спектральными индексами источников каталога Planck в диапазоне 30–217 ГГц. Коэффициенты корреляции по Пирсону составили 0.71 ± 0.02 и 0.81 ± 0.01 соответственно для источников каталога PCCS1 и объектов каталога PCNT.

Для количественных оценок была выполнена линейная аппроксимация восходящих ветвей зависимостей $\alpha_{P1} = f(\alpha_{3.94})$ и $\alpha_{P1} = f(\alpha_{1.4})$. Тангенсы углов наклона β аппроксимирующих прямых зависимостей $\alpha_{P1} = f(\alpha_{3.94})$ составили 0.53 ± 0.07 для выборки источников первой версии каталога Planck (PCCS1) и 0.59 ± 0.06 для выборки нетепловых источников (PCNT), зависимостей $\alpha_{P1} = f(\alpha_{1.4})$: 0.80 ± 0.07 для объектов PCCS1 и 0.85 ± 0.06 для объектов PCNT.

Наклоны аппроксимирующих прямых имеют бóльшую крутизну у зависимостей, построенных по данным каталога PCNT, однако эти различия лежат в пределах ошибок измерений.

Сравнивая величины наклонов аппроксимирующих прямых зависимостей $\alpha_{P1} = f(\alpha_{1.4})$ и

$\alpha_{P1} = f(\alpha_{3.94})$ для RCR-объектов с полученными для нашей выборки NVSS–Planck можно отметить, что тангенсы углов наклона аппроксимирующих прямых зависимостей $\alpha_{P1} = f(\alpha_{1.4})$ совпадают с точностью от 2% для PCNT до 4% для PCCS1. Что касается наклонов аппроксимирующих прямых зависимостей $\alpha_{P1} = f(\alpha_{3.94})$, то значения $\tan \beta$ для рассматриваемой выборки NVSS–Planck-объектов на 34–50% меньше величин, полученных для RCR-объектов. Исключение составляет немногочисленная группа объектов Planck, плотности потоков которых являются продолжением спектров ближайших NVSS-источников или незначительно превышают их (например, источники J0108+0135 и J0221+3556 на рис. 6). У них величины тангенса угла наклона зависимостей $\alpha_{P1} = f(\alpha_{3.94})$ составили 0.77 ± 0.07 и 0.80 ± 0.05 для PCCS1 и PCNT соответственно, что близко к полученным для RCR-объектов значениям.

Стоит обратить внимание на тот факт, что у NVSS-объектов нашей выборки и ближайших к ним объектов Planck наклоны аппроксимирующей прямой зависимости $\alpha_{P1} = f(\alpha_{1.4})$ значительно превышают наклоны аппроксимирующей прямой зависимости $\alpha_{P1} = f(\alpha_{3.94})$, в то время как у RCR-объектов и ближайших к ним горячих пятен эти величины близки. Вероятно, это связано с тем, что у значительного числа источников NVSS нашей выборки плотности потоков на частотах 4.85 ГГц (GB6) превышают рассчитанные в соответствии с $\alpha_{0.15-1.4}$, где $\alpha_{0.15-1.4}$ — двухчастотный спектральный индекс между частотами 0.15 ГГц (TGSS) и 1.4 ГГц (NVSS). Кроме того, в ряде случаев плотность потока объекта на частоте 8.4 ГГц (CLASS) существенно выше плотности потока на частоте 4.85 ГГц (например, источник J2203+3145 на рис. 7). Это может свидетельствовать о переменности источника или о наличии максимума в спектре в диапазоне 1.4–100 ГГц. Подобные спектры, только с максимумом в сантиметровом диапазоне, можно видеть у RCR-объектов J1039+0512, J1616+0459 (рис. 3) и J1521+0430 (рис. 4), являющихся яркими переменными радиоисточниками.

3.1. Совмещенные спектры NVSS-источников и ближайших к ним источников каталога Planck

Спектры NVSS-источников нашей выборки при совмещении их со спектрами близлежащих объектов каталога Planck имеют вид, аналогичный приведенным на рис. 3 и 4 спектрам RCR-источников, совмещенным со спектрами ближайших горячих пятен. Их также можно разделить на три группы. Первая состоит из источников каталога Planck, спектры которых оказываются продолжением спектров ближайших NVSS-источников. Ко

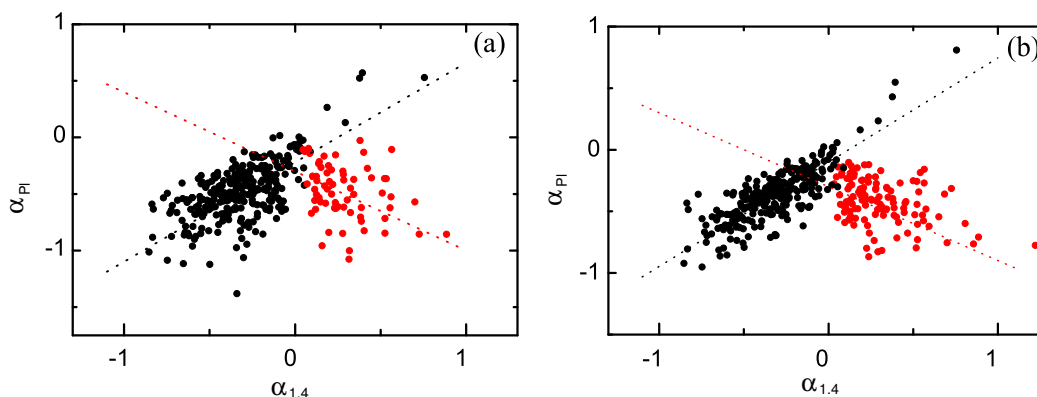


Рис. 5. Зависимости $\alpha_{PI} = f(\alpha_{1.4})$, построенные для выборки объектов каталога Planck и NVSS: (a) — с использованием данных первой версии каталога Planck (PCCS1) (Ade et al. 2014d), (b) — многочастотного каталога нетепловых источников Planck (PCNT) (Akrami et al. 2018). Также показаны аппроксимирующие прямые: черной пунктирной линией — восходящей ветви, красной пунктирной — нисходящей.

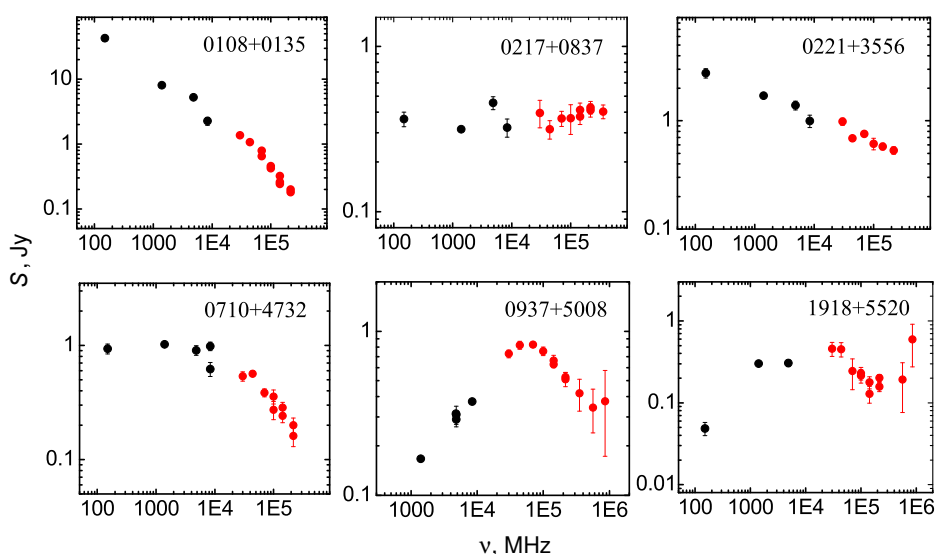


Рис. 6. Совмещенные спектры NVSS-источников нашей выборки и ближайших к ним объектов каталога Planck для объектов первой группы. Черными заполненными кружками обозначены плотности потоков NVSS-объектов из каталогов TGSS, NVSS, GB6, CLASS и из работы Dallacasa et al. (2001), красными заполненными кружками — плотности потоков объектов каталога Planck.

второй принадлежат объекты Planck, плотности потоков которых лежат выше экстраполированных в микроволновую область спектров ближайших NVSS-источников при том, что эти объекты имеют близкие спектральные индексы. К третьей группе относятся NVSS-источники с инверсионными спектрами, которые при совмещении их со спектрами ближайших источников каталога Planck образуют спектры с максимумом на частотах выше 8 ГГц. Примеры спектров источников первой группы показаны на рис. 6. Там же приводятся спектры источников J0937+5008 и J1918+5520, которые относятся к третьей группе объектов с максимумом в совмещенном спектре. На рис. 7 все источники относятся ко второй группе. Красными

кружками обозначены плотности потоков объектов каталога Planck, черными — плотности потоков NVSS-объектов из каталогов TGSS, NVSS, GB6, CLASS и приведенные в статье Dallacasa et al. (2001). В этой работе были получены одновременные радиоспектры источников-кандидатов в HFR. Наблюдения проводились на VLA на частотах 1.365, 1.665, 4.535, 4.985, 8.085, 8.485, 14.96 и 22.46 ГГц. Три источника из указанной работы попали в нашу выборку: J0927+3902, J1645+6330 и J2102+0341.

Несмотря на то, что величины плотностей потоков объектов каталога Planck определены с большой точностью, их совмещенные с ближайшими NVSS-источниками спектры имеют тот же вид,

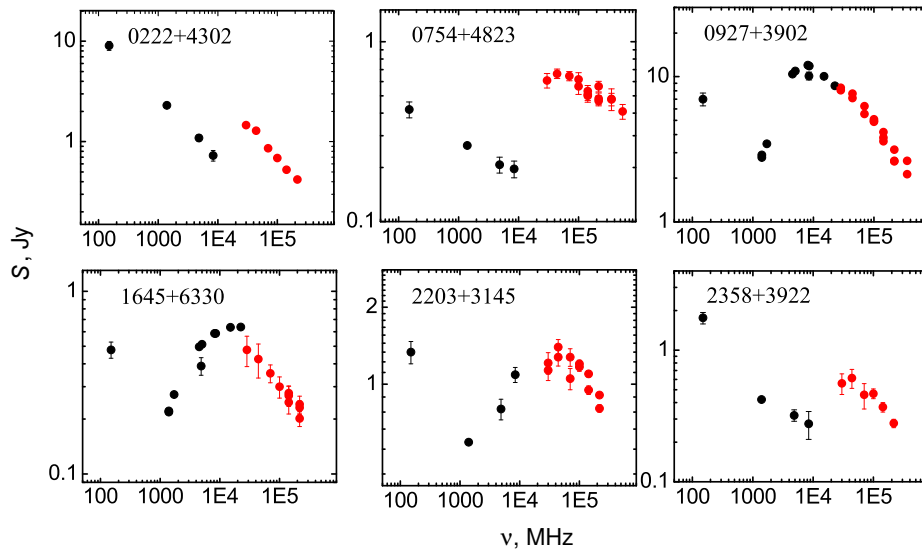


Рис. 7. То же, что и на рис. 6, для объектов второй группы.

что и совмещенные спектры RCR-источников и ближайших горячих пятен. Объяснить поведение совмещенных спектров NVSS-источников, отнесенных ко второй группе, можно случайным совпадением их координат или наличием максимума в спектре.

Подтверждение возможного наличия максимума в спектрах источников, у которых спектральные индексы $\alpha_{1.4}$ близки по величине к спектральным индексам ближайших объектов Planck α_{P1} , а их экстраполированные в микроволновую область спектра плотности потоков оказываются ниже плотностей потоков источников Planck, можно найти, если обратиться к спектрам источников J0927+3902 и J1645+6330 из работы Dallacasa et al. (2001). Они приведены на рис. 7.

Кроме плотностей потоков на частотах каталогов TGSS, NVSS и GB6 на рис. 7 показаны плотности потоков, измеренные одновременно на частотах VLA (Dallacasa et al. 2001). Все перечисленные источники являются квазарами с известными красными смещениями: J2102+0341 ($z = 1.013$), J0927+3902 ($z = 0.6948$) и J1645+6330 ($z = 2.379$), имеют максимумы в спектре на частоте около 10 ГГц и отнесены авторами работы Dallacasa et al. (2001) к HFR-объектам. Похожий спектр наблюдается и у источника J2203+3245 (рис. 7).

На основании вышесказанного приходим к утверждению, что источники второй группы могут иметь максимумы в спектре.

Можно предположить, что и среди не очень ярких объектов RCR-каталога, у которых ближайшие пятна имеют схожие по величине спектральные индексы и плотности потоков которых превышают экстраполированные в микроволновый диа-

пазон плотности потоков RCR-источников, могут оказаться источники с максимумами в диапазоне 3.94–100 ГГц.

4. СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ СПЕКТРАЛЬНЫМИ ИНДЕКСАМИ NVSS-ИСТОЧНИКОВ НА ЧАСТОТАХ 0.15 ГГц И 1.4 ГГц И СПЕКТРАЛЬНЫМИ ИНДЕКСАМИ ИСТОЧНИКОВ КАТАЛОГА PLANCK

В разделе 3 для построения зависимостей $\alpha_{\text{P1}} = f(\alpha_{3.94})$ и $\alpha_{\text{P1}} = f(\alpha_{1.4})$ NVSS-источников и объектов Planck использовались величины плотностей потоков на трех частотах: 0.15 ГГц (TGSS), 1.4 ГГц (NVSS) и 4.85 ГГц (GB6), что может быть недостаточно для получения всей полноты картины.

В настоящем разделе при построении спектров NVSS-источников нашей выборки NVSS–Planck в диапазоне 70 МГц–100 ГГц была использована вся информация о плотностях потоков объектов из базы данных CATS (Verkhodanov et al. 2005). Были построены зависимости $\alpha_{\text{P1}} = f(\alpha_{0.15})$ и $\alpha_{\text{P1}} = f(\alpha_{1.4})$, где $\alpha_{0.15}$ — спектральный индекс NVSS-источника на частоте 150 МГц.

Вычисление спектральных индексов $\alpha_{0.15}$ в диапазоне 70–231 МГц проводилось с использованием данных каталогов GLEAM (Hurley-Walker et al. 2017) и TGSS (Intema et al. 2017). Обзор GLEAM (GaLactic and Extragalactic All-sky Murchison widefield array survey) был проведен в 2013–2014 гг. в полосе 72–231 МГц на 20 частотах, обзор TGSS (Tata institute for fundamental research GMRT Sky

Survey) — на частоте 147 МГц в 2010–2012 гг., обзоры миссии Planck — в 2009–2010 гг. Спектральный индекс $\alpha_{1.4}$ в зависимости от формы спектра источника вычислялся в диапазоне 70 МГц–1.4 ГГц или в диапазоне 1.4 ГГц– ν_{\max} , где ν_{\max} — частота максимума выпуклого спектра.

Зависимости $\alpha_{\text{P1}} = f(\alpha_{0.15})$ и $\alpha_{\text{P1}} = f(\alpha_{1.4})$, построенные на основе этих данных, приведены на рис. 8 и 9. Если плотности потоков на частоте 1.4 ГГц оказывались в частотном диапазоне, где обнаруживалась достаточно сильная переменность источника, и их величины попадали на восходящий участок выпуклого спектра, для оценок $\alpha_{1.4}$ использовался диапазон 1.4 ГГц– ν_{\max} . В таких случаях точность определения спектрального индекса $\alpha_{1.4}$ снижалась (как, например, у источников J0224+0659, J0428 – 3756, J0920+4441, спектры которых показаны на рис. 11), и его значение в основном оказывалось положительной величиной. Примеры зависимостей, построенные для таких источников, показаны на рис. 8.

В дальнейшем мы ограничимся рассмотрением источников, у которых величины плотностей потоков на частоте 1.4 ГГц не сильно отклонялись от аппроксимирующей прямой, проведенной по данным каталога GLEAM. При оценках спектрального индекса $\alpha_{1.4}$ таких источников использовался диапазон 70 МГц–1.4 ГГц. На рис. 9 приведены зависимости $\alpha_{\text{P1}} = f(\alpha_{0.15})$ и $\alpha_{\text{P1}} = f(\alpha_{1.4})$, построенные на основе данных об этих объектах. Точность определения спектральных индексов $\alpha_{0.15}$, $\alpha_{1.4}$ составляет 8–10%.

Отметим, что вид зависимостей $\alpha_{\text{P1}} = f(\alpha_{0.15})$ и $\alpha_{\text{P1}} = f(\alpha_{1.4})$ для этой выборки источников очень близок. В обоих случаях наблюдается линейная корреляция между спектральным индексом α_{P1} и спектральными индексами $\alpha_{0.15}$ и $\alpha_{1.4}$. Коэффициенты корреляции по Пирсону составили 0.75 ± 0.01 и 0.70 ± 0.01 соответственно для восходящих ветвей зависимостей $\alpha_{\text{P1}} = f(\alpha_{0.15})$ и $\alpha_{\text{P1}} = f(\alpha_{1.4})$ и -0.36 ± 0.03 для нисходящих ветвей.

Мы сравнили восходящие ветви зависимостей $\alpha_{\text{P1}} = f(\alpha_{3.94})$ и $\alpha_{\text{P1}} = f(\alpha_{1.4})$, полученные для объектов RCR-каталога и ближайших пятен на картах Planck, и восходящую ветвь зависимости $\alpha_{\text{P1}} = f(\alpha_{0.15})$, полученную для NVSS-источников и ближайших объектов каталога Planck и представленную на рис. 9а. Результаты сравнения показаны на рис. 10. Видно, что семейство точек, соответствующее зависимостям $\alpha_{\text{P1}} = f(\alpha_{0.15})$, достаточно хорошо согласуется с семейством точек, соответствующим зависимостям $\alpha_{\text{P1}} = f(\alpha_{3.94})$ и $\alpha_{\text{P1}} = f(\alpha_{1.4})$, причем наилучшее согласие наблюдается у зависимости $\alpha_{\text{P1}} = f(\alpha_{3.94})$, построенной для выборки RCR-объектов с надежно определенными спектрами. Зависимости $\alpha_{\text{P1}} = f(\alpha_{1.4})$,

полученные для RCR-источников и ближайших пятен, оказываются более крутыми по сравнению с зависимостью $\alpha_{\text{P1}} = f(\alpha_{0.15})$ для источников NVSS–Planck.

Отметим, что диапазон изменения спектрального индекса $\alpha_{3.94}$ RCR-объектов простирается в область отрицательных значений гораздо дальше, чем диапазон изменений $\alpha_{1.4}$, а также спектральных индексов $\alpha_{0.15}$ и $\alpha_{1.4}$ NVSS-объектов (см. рис. 10). Это связано с тем, что у части объектов RCR-каталога происходит укрупнение спектра в диапазоне 1.4–3.94 ГГц, причиной которого может быть потеря энергии электронами.

Как было показано в работе Aatrokoski et al. (2011a), спектральный индекс источников Planck лежит преимущественно в диапазоне $-1.0 < \alpha < 0.2$, что подтверждается и нашими зависимостями, приведенными на рис. 10.

Были проведены аппроксимирующие прямые для восходящих ветвей зависимостей $\alpha_{\text{P1}} = f(\alpha_{0.15})$ и $\alpha_{\text{P1}} = f(\alpha_{1.4})$, которые показаны на панелях (а) и (б) рис. 9 и 10. Тангенс угла наклона аппроксимирующей прямой зависимости $\alpha_{\text{P1}} = f(\alpha_{0.15})$ составил 0.68 ± 0.06 , зависимости $\alpha_{\text{P1}} = f(\alpha_{1.4})$ — 0.65 ± 0.06 , что соответственно на 18–21% меньше тангенса угла наклона аппроксимирующей прямой зависимости $\alpha_{\text{P1}} = f(\alpha_{1.4})$, полученной для RCR-объектов и пятен и на 8–12% меньше $\text{tg } \beta$ аппроксимирующей прямой зависимости $\alpha_{\text{P1}} = f(\alpha_{3.94})$ для тех же объектов. В величинах углов наклона аппроксимирующих прямых эти отличия еще меньше и составили соответственно 14–17% и 6–10%.

Отметим, что крутизна наклонов аппроксимирующих прямых зависимостей $\alpha_{\text{P1}} = f(\alpha_{1.4})$, построенных с использованием только каталогов TGSS, NVSS и GB6 (0.80 ± 0.07 для объектов каталога PCCS1 и 0.85 ± 0.06 — каталога PCNT), оказалась ближе к крутизне наклонов аппроксимирующих прямых тех же зависимостей, построенных для RCR-источников и пятен (0.83 ± 0.07).

Таким образом, наклоны аппроксимирующих прямых зависимостей $\alpha_{\text{P1}} = f(\alpha_{0.15})$, $\alpha_{\text{P1}} = f(\alpha_{1.4})$, полученные в более широком частотном диапазоне и с привлечением данных большего числа каталогов оказались более пологими, чем наклоны зависимостей $\alpha_{\text{P1}} = f(\alpha_{1.4})$, полученные для пятен и RCR-источников, а также для NVSS–Planck-источников с использованием ограниченного числа каталогов (TGSS, NVSS и GB6). Однако привлечение более обширных данных о плотностях потоков NVSS-источников не повлияло на основной вывод о линейной корреляции между спектральными индексами NVSS-объектов в низкочастотном диапазоне спектра (70 МГц–1.4 ГГц) и спектральными индексами ближайших источников Planck в

диапазоне 30–353 ГГц. Она аналогична линейной корреляции, обнаруженной между спектральными индексами RCR-источников и спектральными индексами ближайших положительных пятен на частотных картах Planck.

4.1. Спектры NVSS-источников и ближайших к ним источников каталога Planck

Известно (Ade et al. 2011b; d), что более 90% внегалактических источников каталога Planck отождествлены с источниками других обзоров. У большинства из них преобладает синхротронное излучение. Большая часть радиоисточников имеет относительно плоский спектр ($\alpha > -0.5$), лишь у некоторых из них спектральный индекс круче, чем «канонический» ($\alpha = -0.7$). Спектры источников весьма многообразны и включают плоские, крутые, инверсионные, пиковые, а также многокомпонентные спектры. Существенную роль в необычных спектральных характеристиках играет переменность источников. Многие из идентифицированных радиоисточников являются блазарами, у которых преобладает излучение компактных струй.

На рис. 11, 12 и 13 приведены примеры спектров NVSS-источников в диапазоне от 70 МГц до 857 ГГц и плотности потоков объектов каталога Planck, удаленных от них не более, чем на ± 1.5 . Совмещенные спектры NVSS и Planck-источников, представленные на этих рисунках, а также на рис. 6 и 7, принадлежат к различным классам объектов, таким как компактные источники с крутыми спектрами (Compact-Steep Spectrum Sources, CSS), а также к источникам с максимумом на гигагерцовых частотах: GPS и HFP, которые, как предполагается, являются молодыми объектами (Dallacasa et al. 2001, Fanti et al. 1990, Kunert-Bajraszewska et al. 2010, O’Dea et al. 1991, Tinti et al. 2005) и предшественниками радиоисточников типа FRI и FRII (Fanaroff and Riley 1974), то есть HFP-источники эволюционируют в GPS-источники, а затем в FRI и FRII (Kunert-Bajraszewska et al. 2010).

Недавно были проведены исследования родственного класса радиогромких AGN, а именно MPS-источников (Megahertz-Peaked Spectrum), которые имеют максимум на частотах ниже 1 ГГц (Corpejans et al. 2016; 2015, Falcke et al. 2004). MPS-источники, как полагают, включают CSS-источники, а также GPS и HFP с большими красными смещениями, такими, что частота оборота сместилась ниже 1 ГГц в результате космологической эволюции (Corpejans et al. 2015). Самая многочисленная выборка источников с пиковым спектром на мегагерцовых частотах представлена в каталоге GLEAM (Hurley-Walker et al. 2017).

Кроме источников с крутыми, ультракрутыми и плоскими спектрами особый интерес представляют объекты с сильной переменностью, у которых верхняя огибающая всего спектра выпуклая, а нижняя, скорее, пологая или плоская. Эти источники имеют крутую степенную составляющую спектра на низких частотах и инвертированную составляющую на высоких частотах, что может указывать на несколько эпох активности AGN, сопровождающихся вспышками. Частота оборота и форма спектра меняются в зависимости от активности. В спокойной фазе форма спектра может быть полой или крутой. В основном это источники с активными галактическими ядрами, среди которых много блазаров.

Примеры таких спектров с выпуклой верхней огибающей и чрезвычайно высокой переменностью можно видеть у объектов на рис. 11 и у источников J1645+6339, J2101+0341 на рис. 13. Многочисленные примеры объектов с выпуклыми спектрами приведены также в работе Torniiainen et al. (2005).

Анализируя спектры таких источников нашей выборки мы видим, что поведение плотностей потоков объектов каталога Planck в диапазоне частот 30–353 ГГц аналогично поведению плотностей потоков отождествленных с ними источников каталога NVSS в низкочастотном диапазоне (70 МГц–1400 ГГц): наклоны спектров и величины спектральных индексов близки. Подобную картину можно видеть и в спектрах источников, приведенных на рис. 12, а также у источника J0927+3902 на рис. 13. Величины их плотностей потоков на частотах Planck существенно выше плотностей потоков NVSS-источников, аппроксимированных в высокочастотную область спектра. Они имеют типичный крутой спектр радиогалактики до 20 ГГц, выпуклость вблизи 40 ГГц и последующий спектральный спад, который характеризует оптически тонкое синхротронное излучение. В работах Ade et al. (2011d), Bolton et al. (2006), Torniiainen et al. (2005), Tornikoski et al. (2001) было высказано предположение о том, что такие спектры являются явным признаком переменности источника, причем на временных масштабах не менее двух недель.

Кроме того, они могут быть результатом суперпозиции излучения от нескольких компонент источника, которая описывается «ударно-струйной» моделью радиоисточников с джетами (Marscher and Gear 1985). Один компонент — струя (джет) — дает плоский спектр $\alpha \sim 0$ до некоторой частоты излома ($\nu \sim 10\text{--}100$ ГГц), выше которого спектр становится крутым со спектральным индексом $\alpha \sim -0.7$. Второй компонент, связанный с развивающейся ударной волной в джете, производит самопоглощающийся синхротронный спектр с частотой оборота порядка 100 ГГц. Ниже этой частоты оборота спектр сильно инвертирован. По

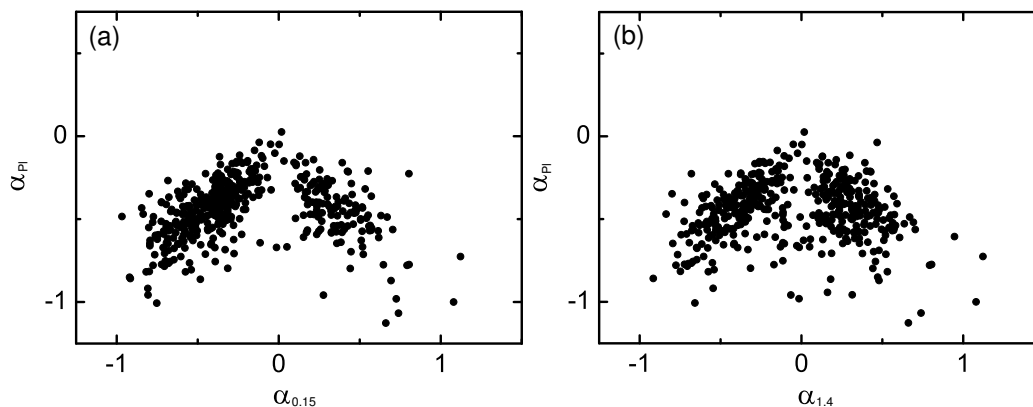


Рис. 8. Зависимости $\alpha_{P1} = f(\alpha_{0.15})$ и $\alpha_{P1} = f(\alpha_{1.4})$, построенные на основе данных о плотностях потоков источников NVSS и объектов каталога Planck. Спектральные индексы $\alpha_{1.4}$ вычислялись в диапазоне частот 70 МГц–1.4 ГГц.

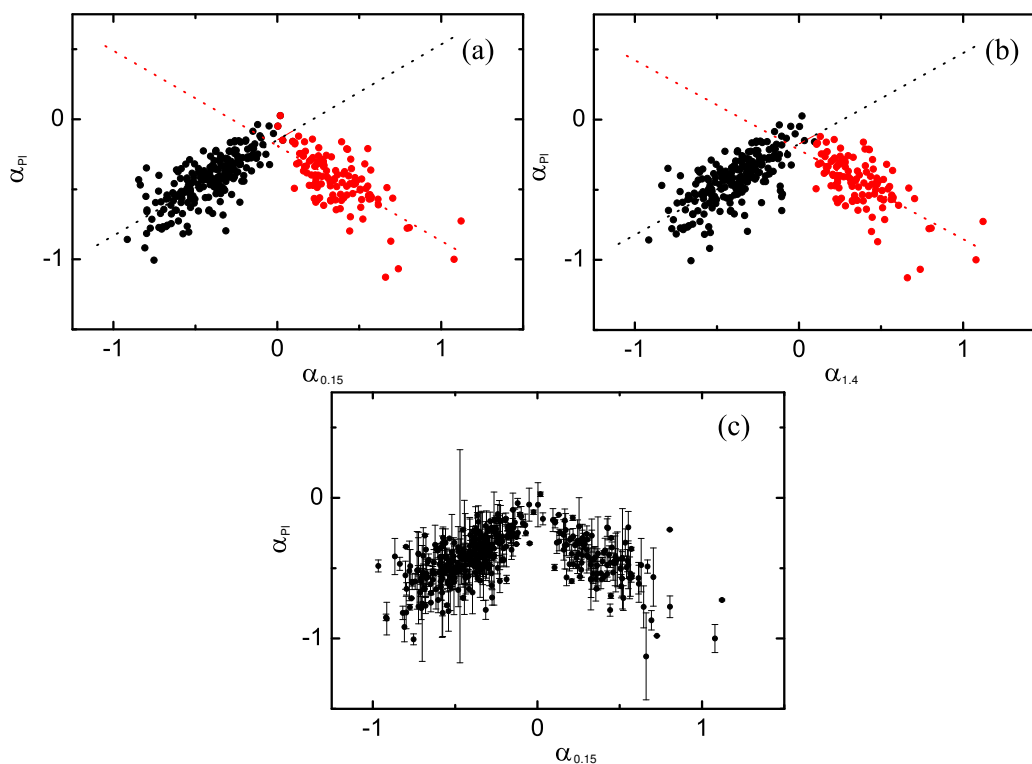


Рис. 9. Зависимости $\alpha_{P1} = f(\alpha_{0.15})$ и $\alpha_{P1} = f(\alpha_{1.4})$, построенные на основе данных о плотностях потоков источников NVSS и объектов каталога Planck: на панелях (a), (b) — для всей выборки источников, на панели (c) — только для тех объектов, у которых спектральные индексы $\alpha_{1.4}$ вычислялись в диапазоне частот 70 МГц–1.4 ГГц. Пунктирными линиями показаны аппроксимирующие прямые восходящей (черная линия) и нисходящей (красная линия) ветвей зависимостей. На панели (c) приводится зависимость $\alpha_{P1} = f(\alpha_{0.15})$ с ошибками определения α_{P1} .

мере развития ударной волны частота оборота и плотность потока ударной составляющей изменяются, а в некоторых фазах заметный вклад второго компонента может вообще отсутствовать, и в этих случаях высокочастотный пик в спектре у этих объектов может быть временной особенностью.

В работах Aatrokoski et al. (2011a), Ade et al. (2016d) было проведено исследование непрерывных спектров внегалактических радиоисточников,

основанных на данных о компактных источниках каталога Planck Early Release (ERCSC) и одновременных многочастотных данных. Было продемонстрировано, как скачки уплотнения в джете, каждый в своей фазе развития, формируют радиоспектры по мере их движения в релятивистской струе. Примеры таких спектров представлены на рис. 18–121 работы Aatrokoski et al. (2011a). На рис. 11 приведены спектры двух источников из

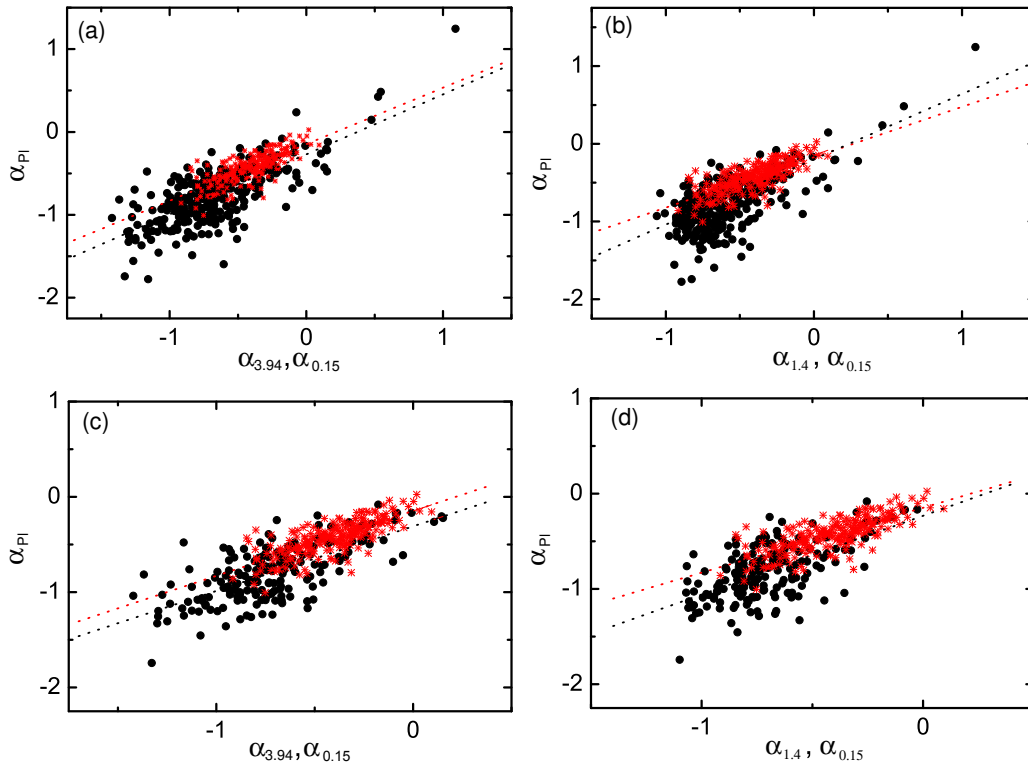


Рис. 10. Зависимости $\alpha_{PI} = f(\alpha_{3.94})$ и $\alpha_{PI} = f(\alpha_{1.4})$, полученные для RCR-источников и ближайших пятен на картах Planck, плотности потоков которых оценивались с помощью калибровочных кривых (черные кружки), с аппроксимирующими прямыми (черные пунктирные линии) и зависимости $\alpha_{PI} = f(\alpha_{0.15})$, $\alpha_{PI} = f(\alpha_{1.4})$, полученные для NVSS-источников и ближайших объектов каталога Planck (красные крестики), с аппроксимирующими прямыми (красные пунктирные линии). На панелях (a), (b) показаны зависимости для всей выборки RCR-объектов, на панелях (c), (d) — только для объектов с надежно определенными спектрами в диапазоне частот 100–217 ГГц. Спектральные индексы $\alpha_{1.4}$ NVSS-источников определялись в диапазоне частот 70 МГц–1.4 ГГц.

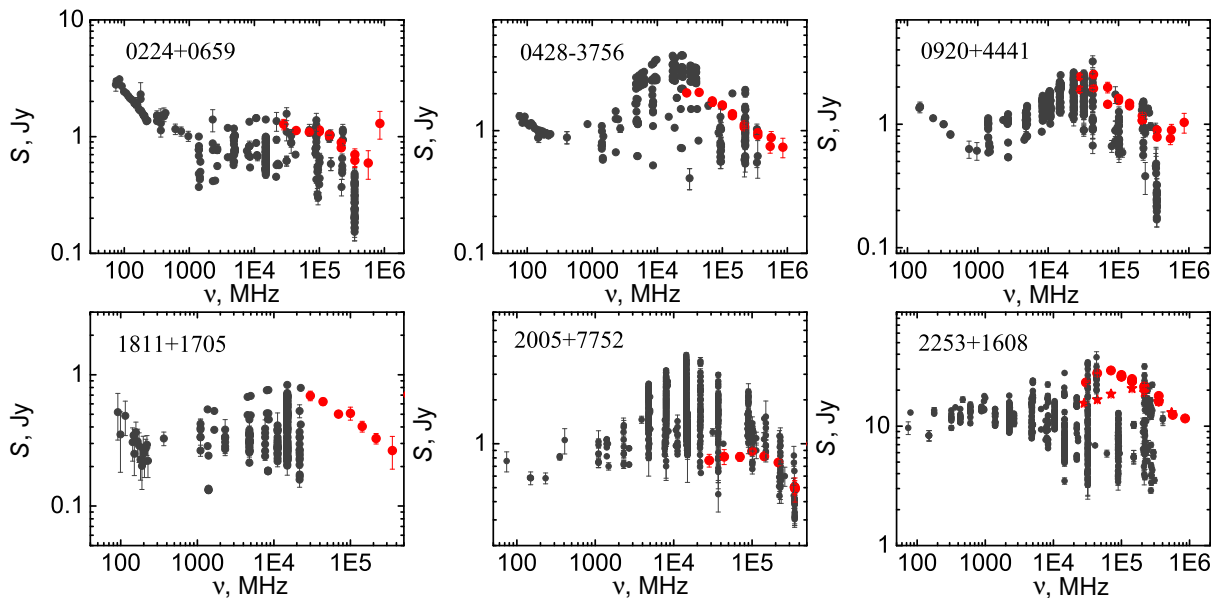


Рис. 11. Примеры спектров NVSS–Planck-источников с высокой степенью переменности, у которых преобладает излучение компактных струй. Плотности потоков источников из каталога Planck обозначены красными заполненными кружками и звездочками, черными заполненными кружками — плотности потоков NVSS-источников.

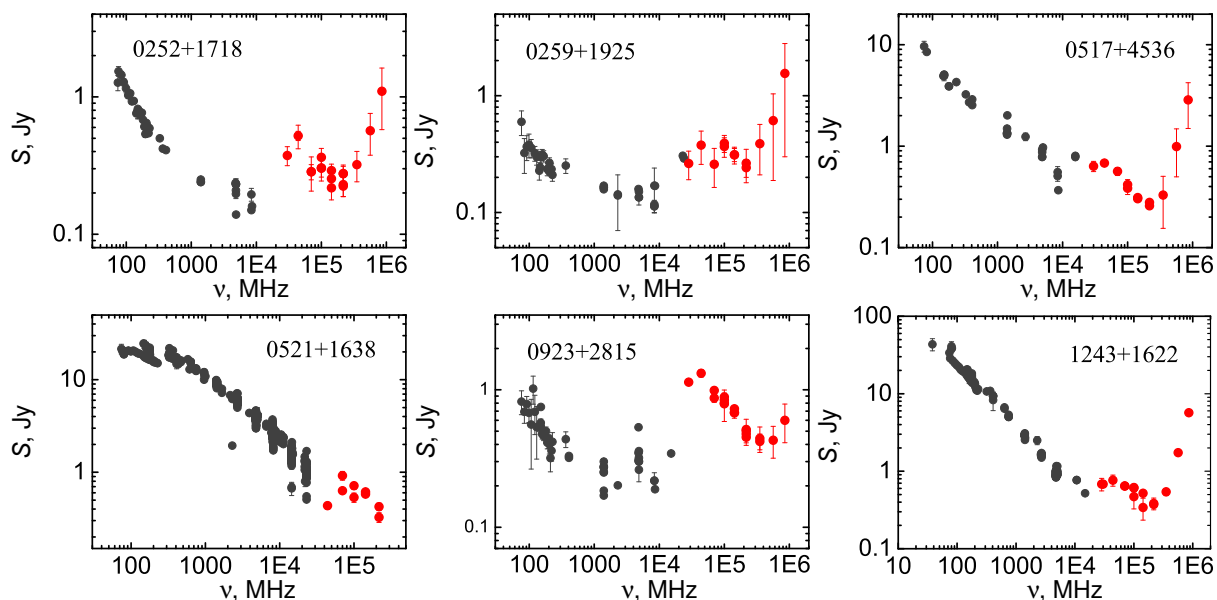


Рис. 12. То же, что и на рис. 11, но для источников с меньшей переменностью и для компактных источников с крутыми спектрами (CSS).

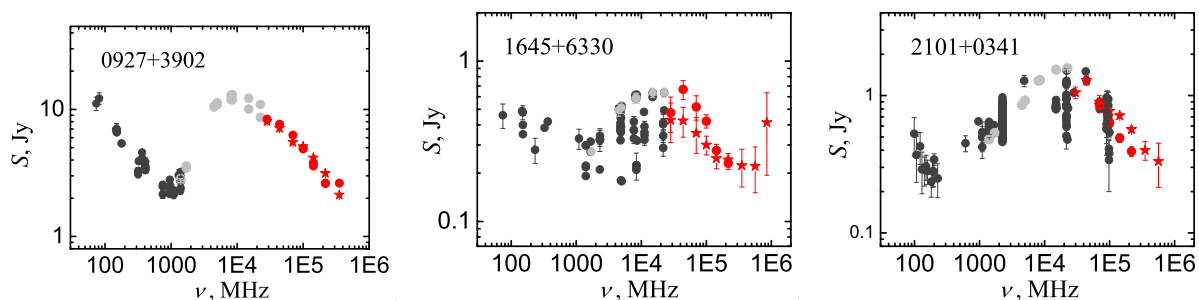


Рис. 13. То же, что и на рис. 11, но с добавлением данных о плотности потоков NVSS-источников из работы Dallacasa et al. (2001). Последние обозначены серыми заполненными кружками.

этой работы, J2005+7752 и J2253+1609. У этих объектов наблюдаются выпуклости в спектре на частотах Planck в диапазоне 30–100 ГГц, наличие которых объясняют вспышками, вызванными прохождением ударной волны в джете⁷. Источники показывают сильную переменность.

Подобные спектры можно видеть и у источников, приведенных на рис. 12. В спокойной фазе их спектр довольно крутой, подобный спектрам основной массы источников RCR-каталога, далее — выпуклость на частоте около 40 ГГц. На частотах свыше 40 ГГц спектр спадающий, причем угол наклона в этой части спектра близок углу наклона в низкочастотном диапазоне. У источника J0252+1718 на спектре показаны величины плотностей потоков на частотах Planck, измеренные в разное время. Спектры, поведение которых ана-

логично приведенным на рис. 12, можно видеть у источников J0754+4820 и J2100 – 2932 в работе Ade et al. (2011d) (рис. 5).

И, наконец, источник J0521+1638 на рис. 12, имеющий крутой спектр и переменность, которая проявляется как на частотах Planck, так и на низких частотах (около 100 МГц), возможно, является источником CSS.

На рис. 13 показаны спектры источников, вошедших в список кандидатов в HFR, у которых плотности потоков были измерены одновременно на нескольких частотах на интерферометре VLA (Dallacasa et al. 2001) и в дальнейшем дополнены данными из каталога Planck. На рисунке величины плотностей потоков на частотах VLA обозначены серыми заполненными кружками. На них хорошо виден переход с одного уровня плотностей потоков на более высокий, вызванный вспышечной активностью.

⁷Примеры спектров этих источников приведены на рис. 102 и 119 в работе Aatrokoski et al. (2011a).

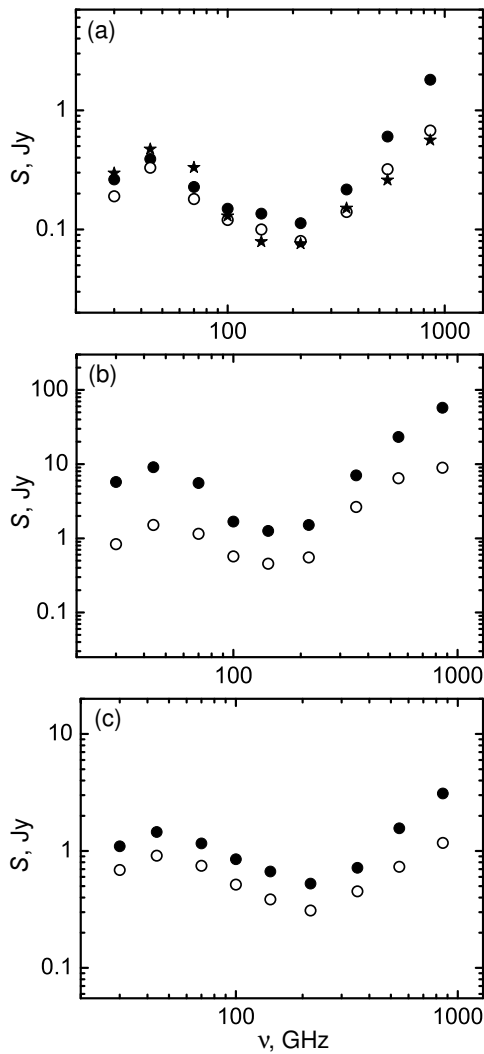


Рис. 14. (a) — зависимости средних S_{mean} и медианных S_{med} значений плотностей потоков пятен, обнаруженных вблизи RCR-источников, от частоты. S_{mean} обозначены заполненными, S_{med} — незаполненными кружками. Звездочками показаны величины $S_{\text{min}}^{\text{Pl}}$. (b) — спектры средних S_{mean} и медианных S_{med} значений плотностей потоков источников первой версии каталога Planck (PCCS1), (c) — его второй версии (PCCS2).

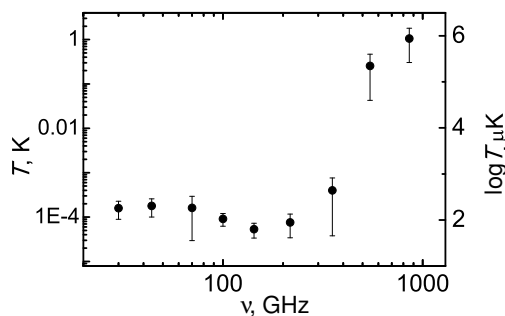


Рис. 15. Спектр усредненной термодинамической температуры \bar{T} пятен, располагающихся вблизи RCR-источников, в логарифмическом масштабе.

Поведение совмещенных континуальных спектров NVSS-источников и ближайших объектов каталога Planck дает основание предположить, что и положительные пятна на картах Planck, которые обнаружены вблизи RCR-источников и имеют близкие по величине спектральные индексы, с плотностями потоков, превышающими плотности потоков этих источников, экстраполированных в микроволновую область, могут оказаться проявлениями переменности этих объектов.

5. ЗАВИСИМОСТИ СРЕДНИХ И МЕДИАННЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПЛОТНОСТЕЙ ПОТОКОВ ПЯТЕН, ОБНАРУЖЕННЫХ ВБЛИЗИ RCR-ИСТОЧНИКОВ

Был проведен анализ средних S_{mean} и медианных S_{med} значений плотностей потоков пятен, обнаруженных вблизи RCR-объектов в различных частотных каналах. Зависимости S_{mean} и S_{med} от частоты ν приведены на рис. 14а. Можно видеть, что в диапазоне 30–353 ГГц спектры средних и медианных значений плотностей потоков пятен аналогичны спектру минимальных плотностей потоков источников каталога Planck, а средние и медианные значения близки по величине к половинным значениям минимальных плотностей потоков объектов Planck. На частотах более 353 ГГц средние значения плотностей потоков пятен существенно выше медианных величин, а также минимальных плотностей потоков источников Planck. Это объясняется наличием на частотных картах протяженных горячих пятен, размеры которых значительно превышают величину полуширины диаграммы направленности комплекса HFI, и которые, возможно, связаны с протяженными пылевыми источниками или фоновыми компонентами излучения пыли.

На том же рисунке показаны спектры средних S_{mean} и медианных S_{med} значений плотностей потоков источников каталога Planck. Можно видеть, что ход зависимостей аналогичен полученным для положительных пятен. Все спектры имеют максимум на частоте 44 ГГц, минимум у объектов первой версии каталога на частоте 143 ГГц, у объектов второй версии каталога и положительных пятен — на частоте 217 ГГц. На высоких частотах наблюдается рост S_{mean} и S_{med} с частотой, что свидетельствует о пылевой природе источников в этом диапазоне.

Были рассчитаны также средние величины термодинамических температур пятен \bar{T} (К) в долях среднеквадратичного отклонения шума σ_p (К) по площадке, \bar{T} / σ_p (К), на разных частотах. Величина усредненных в диапазоне частот 30–353 ГГц значений \bar{T} / σ_p (К) составила 2.04 ± 0.22 , меняясь от 1.7 ± 0.5 до 2.2 ± 1.8 в зависимости от

частоты канала. На частотах 545 и 857 ГГц величина $\bar{T} (K)/\sigma_p (K)$ составила 2.6 ± 5.4 и 5.1 ± 18.0 соответственно. Таким образом, амплитуды положительных флуктуаций, или горячих пятен, обнаруженных вблизи RCR-источников на картах Planck в этом частотном диапазоне, близки к 2σ . Это объясняет близость величин S_{mean} и S_{med} к половинным величинам минимальных значений плотностей потоков источников каталога Planck в диапазоне 30–353 ГГц.

Приведем еще спектр усредненной термодинамической температуры пятен \bar{T} , обнаруженных вблизи RCR-объектов. Спектр представлен на рис. 15 в логарифмическом масштабе как $\bar{T} = f(\nu)$ и как зависимость $\lg \bar{T} = f(\nu)$. Последнюю мы сравнили с зависимостью $\lg T = f(\nu)$, приведенной в работе De Zotti et al. (2004) на рис. 1. На этом рисунке показаны галактические и внегалактические вклады в спектр мощности переднего плана для трех значений мультиполей l . Спектры мощности из работы De Zotti et al. (2004) для $l = 100, 200, 1000$ были получены непосредственно по данным WMAP при более высоких значениях l путем суммирования в квадратуре вкладов всех классов внегалактических источников, рассчитанных на основе моделей de Zotti et al. (2005). В число внегалактических источников входили канонические радиоисточники, галактики со вспышками звездообразования, протосфероидальные галактики и проявления эффекта Сюняева–Зельдовича. На больших масштабах $\Theta > 30'$ и $l \sim 100$ доминирует диффузное галактическое излучение, минимум в спектре мощности приходится на частоты 60–80 ГГц. С увеличением номера мультиполя $l > 200$ и при переходе к масштабам $\Theta \leq 30'$ спектр мощности галактического излучения довольно круто падает, а относительный вклад внегалактических источников возрастает. Спектр мощности внегалактических источников имеет минимум на частотах около 140 ГГц, который смещается на более высокие частоты с увеличением номера мультиполя. На высоких частотах могут проявляться как флуктуации галактической пыли, так и горячая пыль ярких пылевых протосфероидальных галактик.

Спектр усредненной термодинамической температуры горячих пятен, располагающихся вблизи RCR-источников (рис. 15), близок к спектру, полученному для внегалактических источников на высоких мультиполях, в частности, по расположению минимума и резкому подъему на частотах выше 353 ГГц. Количественно на всех частотах усредненные температуры пятен превышают значения температур, приведенных на рис. 1 в работе De Zotti et al. (2004).

Таким образом, вид полученного спектра усредненных температур горячих пятен свидетельствует в пользу того, что большинство пятен может

иметь внегалактическую природу: синхротронную на частотах ниже 353 ГГц и пылевую на частотах, больших или равных 353 ГГц, что является еще одним аргументом в пользу связи пятен с ближайшими внегалактическими источниками RCR-каталога. Количественное же превышение усредненных температур пятен, выявленных на картах Planck, над полученными с помощью моделирования (de Zotti et al. 2005), может свидетельствовать о присутствии галактических составляющих синхротронного фона или о возможном проявлении переменности источников в микроволновом диапазоне.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе было продолжено изучение связи положительных флуктуаций на частотных картах Planck с ближайшими радиоисточниками каталога RCR. Основное внимание было уделено сравнению спектров положительных пятен со спектрами RCR-источников. В работе Majorova and Zhelenkova (2021) было показано, что в диапазоне 30–217 ГГц эти пятна имеют спектры, аналогичные спектру синхротронного излучения, и что они могут быть проявлениями источников или их родительских галактик в субмиллиметровом диапазоне длин волн. Не исключалась также возможность того, что они являются остаточным вкладом фонового галактического синхротронного излучения. Отметим, что на частотах 353–857 ГГц часть обнаруженных пятен имеет спектр, указывающий на их «пылевую» природу.

Для уточнения природы этих пятен в настоящей работе мы провели сравнение спектральных индексов пятен, обнаруженных на частотных картах Planck, со спектральными индексами ближайших RCR-источников⁸, для чего были построены зависимости $\alpha_{p1} = f(\alpha_{3.94})$ и $\alpha_{p1} = f(\alpha_{1.4})$, где $\alpha_{1.4}$ — спектральный индекс RCR-источника на частоте 1.4 ГГц, $\alpha_{3.94}$ — спектральный индекс RCR-источника на частоте 3.94 ГГц и α_{p1} — спектральный индекс пятна в диапазоне частот 30–217 ГГц.

Была обнаружена линейная корреляция между спектральными индексами RCR-источников и спектральными индексами ближайших пятен. Коэффициенты корреляции по Пирсону составили 0.67–0.75. Корреляция сохраняется для разных подвыборок RCR-объектов: для всех источников, вблизи которых обнаружены пятна в диапазоне 30–217 ГГц, для источников с надежно определенными спектрами, у которых плотности потоков известны на трех и более частотах, а также для

⁸Координаты RCR-источников отличаются от координат центров пятен не более чем на $\pm 2'.5$.

Таблица 1. Названия и координаты источников, спектры которых приведены на рисунках

J ₂₀₀₀ Name	RA ₂₀₀₀	Dec ₂₀₀₀	J ₂₀₀₀ Name	RA ₂₀₀₀	Dec ₂₀₀₀
0108 + 0135	01:08:38.75	+01 : 34 : 58.90	1006+0509	10:06:37.64	+05:09:53.60
0217 + 0837	02:17:17.10	+08 : 37 : 03.20	1031+0443	10:31:19.19	+04:43:11.30
0221 + 3556	02:21:05.48	+35 : 56 : 13.60	1038+0512	10:38:46.84	+05:12:29.60
0222 + 4302	02:22:39.48	+43 : 02 : 08.40	1052+0457	10:52:53.05	+04:57:35.30
0224 + 0659	02:24:28.28	+06 : 59 : 24.70	1145+0455	11:45:21.30	+04:55:26.55
0252 + 1718	02:52:07.68	+17 : 18 : 43.30	1239+0443	12:39:32.78	+04:43:05.30
0259 + 1925	02:59:29.65	+19 : 25 : 45.10	1243+1622	12:43:57.63	+16:22:52.70
0406 + 0447	04:06:26.84	+04 : 47 : 53.30	1342+0504	13:42:43.57	+05:04:31.50
0428 - 3756	04:28:40.41	-37 : 56 : 19.80	1351+0435	13:51:37.56	+04:35:42.00
0517 + 4536	05:17:28.54	+45 : 37 : 02.80	1424+0434	14:24:09.47	+04:34:51.70
0521 + 1638	05:21:09.93	+16 : 38 : 22.20	1511+0518	15:11:41.19	+05:18:09.40
0710 + 4732	07:10:46.16	+47 : 32 : 11.20	1521+0430	15:21:14.51	+04:30:20.00
0733 + 0456	07:33:57.46	+04 : 56 : 14.10	1616+0459	16:16:37.49	+04:59:32.80
0736 + 0450	07:36:16.54	+04 : 50 : 56.10	1645+6330	16:45:58.57	+63:30:11.00
0749 + 0438	07:49:11.29	+04 : 38 : 35.90	1811+1705	18:11:43.18	+17:04:56.80
0754 + 4823	07:54:45.66	+48 : 23 : 50.20	1918+5520	19:18:10.73	+55:20:39.30
0807 + 0432	08:07:57.60	+04 : 32 : 34.60	2101+0341	21:01:38.85	+03:41:32.30
0813 + 0457	08:13:14.55	+04 : 57 : 08.50	2203+3145	22:03:14.98	+31:45:38.70
0920 + 4441	09:20:58.48	+44 : 41 : 53.70	2205+7752	20:05:31.30	+77:52:43.80
0923 + 2815	09:23:51.54	+28 : 15 : 27.10	2253+1608	22:53:57.70	+16:08:53.40
0927 + 3902	09:27:03.04	+39 : 02 : 20.70	2358+3922	23:58:59.84	+39:22:29.40
0937 + 5008	09:37:12.33	+50 : 08 : 52.50			

случая, когда спектральные индексы пятен определялись только в диапазоне частот 100–217 ГГц. Аппроксимирующие прямые восходящих ветвей зависимостей $\alpha_{P1} = f(\alpha_{3.94})$ и $\alpha_{P1} = f(\alpha_{1.4})$ у разных подвыборок RCR-источников имеют несколько отличные величины углов наклона, однако эти различия лежат в пределах ошибок измерений. Так, спектральные индексы пятен, определенные в диапазоне частот 100–217 ГГц, оказались круче, чем спектральные индексы α_{P1} , которые оценивались между 30 и 217 ГГц, что говорит о тенденции к укрупнению спектров пятен с увеличением частоты.

Были построены совмещенные спектры RCR-объектов и ближайших к ним положительных пятен, которые можно разделить на три группы. К первой группе относятся RCR-источники, у которых спектры ближайших пятен являются про-

должением спектров самих источников; у второй группы спектральные индексы источников и пятен близки по величине, но плотности потоков пятен располагаются выше плотностей потоков RCR-объектов, аппроксимированных в микроволновую область спектра; у третьей группы RCR-источники имеют инверсионный спектр, который при совмещении его со спектром пятна образует спектр с максимумом на частотах выше 8 ГГц.

Для объектов первой группы вероятность того, что пятна являются проявлениями RCR-источников в микроволновом диапазоне, достаточно высока. То же можно сказать и об источниках, входящих в третью группу. Если RCR-объекты этой группы связаны с близлежащими пятнами, их можно рассматривать в качестве кандидатов в источники с пиковыми спектрами (GPS или HFP).

Для того чтобы объяснить поведение совмещенных спектров источников второй группы, было высказано несколько предположений:

- 1) превышение плотностей потоков пятен над экстраполированными плотностями потоков ближайших RCR-источников связано с недостаточной точностью калибровочных кривых;
- 2) источники и ближайшие пятна не связаны между собой, и имеет место случайное совпадение их координат;
- 3) пятна представляют собой положительные флуктуации шума или являются проявлением фонового синхротронного излучения;
- 4) такой вид спектра может свидетельствовать о переменности источника.

Для проверки этих предположений были построены совмещенные спектры NVSS-источников и ближайших источников из каталога Planck, плотности потоков которых определены достаточно надежно, а также зависимости $\alpha_{P1} = f(\alpha_{0.15})$, $\alpha_{P1} = f(\alpha_{1.4})$ и $\alpha_{P1} = f(\alpha_{3.94})$, где α_{P1} — спектральный индекс источника каталога Planck в диапазоне 30–217 ГГц, $\alpha_{0.15}$, $\alpha_{1.4}$ и $\alpha_{3.94}$ — спектральные индексы NVSS-объектов на частотах 150 МГц, 1.4 ГГц и 3.94 ГГц. Оказалось, что вид этих зависимостей аналогичен характеру зависимостей, связывающих спектральные индексы RCR-источников и спектральные индексы ближайших пятен. Различия в тангенсах углов наклона аппроксимирующих прямых зависимостей, построенных для RCR-источников и пятен и объектов каталогов NVSS и Planck, составили 8–21% (в величинах углов наклона 6–17%).

Анализ совмещенных спектров NVSS-источников и отождествленных с ними объектов каталога Planck показал, что достаточно большая доля источников рассматриваемой выборки имеет спектры, у которых спектральные индексы в диапазоне 70–230 МГц близки по величине к спектральным индексам в диапазоне частот Planck 30–217 ГГц⁹, при этом плотности потоков объектов Planck превышают экстраполированные в микроволновую область плотности потоков NVSS-источников. Вид спектров этих источников аналогичен совмещенным спектрам, полученным для RCR-источников и ближайших положительных пятен на картах Planck. Эти источники имеют крутой спектр примерно до частот 10–20 ГГц, далее инвертированный спектр и максимум вблизи частоты 40 ГГц с последующим спектральным

спадом, обусловленным оптически тонким синхротронным излучением. Предполагается, что такие спектры являются явным признаком переменности источника, причем на временных масштабах не менее двух недель, как указывается в работах Ade et al. (2011d), Bolton et al. (2006), Tornaiainen et al. (2005), Tornikoski et al. (2001).

То, что совмещенные спектры RCR-источников и ближайших горячих пятен имеют аналогичные спектры, дает основание предположить, что положительные пятна на картах Planck, совпадающие с координатами RCR-источников и имеющие близкие по величине спектральные индексы, могут оказаться проявлениями переменности этих объектов.

Проведен анализ медианных S_{med} и средних S_{mean} значений плотностей потоков пятен, обнаруженных вблизи RCR-объектов, в зависимости от частоты. Спектры S_{med} и S_{mean} оказались аналогичны спектру минимальных плотностей потоков источников каталога Planck, а их величины близки по величине к половинным значениям минимальных плотностей потоков объектов Planck. Исключение составили величины средних значений плотностей потоков пятен на частотах более 353 ГГц, где они превышают как медианные величины, так и значения минимальных плотностей потоков источников Planck.

Получен спектр усредненных температур горячих пятен, обнаруженных вблизи RCR-источников, который показал количественное превышение усредненных температур пятен, выявленных на картах Planck, над полученными с помощью моделирования (de Zotti et al. 2005). Вид полученного спектра свидетельствует в пользу того, что большинство пятен имеет внегалактическую природу: синхротронную на частотах ниже 353 ГГц и пылевую на частотах, больших или равных 353 ГГц. Это может быть еще одним аргументом в пользу связи пятен с ближайшими RCR-источниками, которые в большинстве своем являются внегалактическими объектами. В этой связи можно предположить, что вклад неучтенных радиоисточников в фон переднего плана может влиять на результирующую карту космологического микроволнового фона, в частности, на угловой спектр анизотропии реликтового излучения на угловых масштабах порядка $5'$ – $15'$.

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. В работе применялась система обработки радиоастрономических данных FADPS.

⁹Для тех источников, у которых нет пылевой составляющей, этот диапазон простирается от 30 до 857 ГГц.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликт интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J. Aatrokoski et al. (Planck Collab.), *Astron. and Astrophys.* **536**, id. A15 (2011a).
2. K. N. Abazajian, J. K. Adelman-McCarthy, M. A. Agüeros, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **182** (2), 543 (2009).
3. R. Adam et al. (Planck Collab.), *Astron. and Astrophys.* **594**, id. A10 (2016a).
4. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), *Astron. and Astrophys.* **536**, id. A7 (2011b).
5. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), *Astron. and Astrophys.* **536**, id. A8 (2011c).
6. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), *Astron. and Astrophys.* **536**, id. A14 (2011d).
7. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), *Astron. and Astrophys.* **550**, id. A133 (2013).
8. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), *Astron. and Astrophys.* **571**, id. A1 (2014a).
9. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), *Astron. and Astrophys.* **571**, id. A16 (2014b).
10. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), *Astron. and Astrophys.* **571**, id. A20 (2014c).
11. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), *Astron. and Astrophys.* **571**, id. A28 (2014d).
12. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), *Astron. and Astrophys.* **582**, id. A28 (2015).
13. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), *Astron. and Astrophys.* **594**, id. A26 (2016b).
14. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), *Astron. and Astrophys.* **594**, id. A27 (2016c).
15. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), *Astron. and Astrophys.* **596**, id. A106 (2016d).
16. H. Aihara, C. Allende Prieto, D. An, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **193** (2), 29 (2011).
17. Y. Akrami et al. (Planck Collab.), *Astron. and Astrophys.* **619**, id. A94 (2018).
18. C. L. Bennett, M. Halpern, G. Hinshaw, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **148** (1), 1 (2003).
19. C. L. Bennett, D. Larson, J. L. Weiland, et al., *VizieR Online Data Catalog J/ApJS/208/20* (2013).
20. E. Bertin and S. Arnouts, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **117**, 393 (1996).
21. N. W. Boggess, J. C. Mather, R. Weiss, et al., *Astrophys. J.* **397**, 420 (1992).
22. R. C. Bolton, C. J. Chandler, G. Cotter, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **367** (1), 323 (2006).
23. A. S. Cohen, W. M. Lane, W. D. Cotton, et al., *Astron. J.* **134** (3), 1245 (2007).
24. J. J. Condon, W. D. Cotton, E. W. Greisen, et al., *Astron. J.* **115** (5), 1693 (1998).
25. R. Coppejans, D. Cseh, S. van Velzen, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **459** (3), 2455 (2016).
26. R. Coppejans, D. Cseh, W. L. Williams, et al., *VizieR Online Data Catalog J/MNRAS/450/1477* (2015).
27. D. Dallacasa, M. Bondi, W. Alef, and F. Mantovani, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **129**, 219 (1998).
28. D. Dallacasa, C. Stanghellini, M. Centonza, and R. Fanti, *VizieR Online Data Catalog J/A+A/363/887* (2001).
29. G. De Zotti, C. Burigana, M. Negrello, et al., *arXiv e-prints astro-ph/0411182* (2004).
30. G. de Zotti, M. Massardi, M. Negrello, and J. Wall, *Astron. Astrophys. Rev.* **18** (1–2), 1 (2010).
31. G. de Zotti, R. Ricci, D. Mesa, et al., *Astron. and Astrophys.* **431** (3), 893 (2005).
32. H. Falcke, E. Körding, and N. M. Nagar, *New Astronomy Reviews* **48** (11–12), 1157 (2004).
33. B. L. Fanaroff and J. M. Riley, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **167**, 31P (1974).
34. C. Fanti, R. Fanti, P. Parma, et al., *Astron. and Astrophys.* **143**, 292 (1985).
35. R. Fanti, C. Fanti, R. T. Schilizzi, et al., *Astron. and Astrophys.* **231**, 333 (1990).
36. B. R. Granett, M. C. Neyrinck, and I. Szapudi, *Astrophys. J.* **683** (2), L99 (2008).
37. P. C. Gregory, W. K. Scott, K. Douglas, and J. J. Condon, *Astrophys. J. Suppl.* **103**, 427 (1996).
38. J. S. Hey, S. J. Parsons, and J. W. Phillips, *Proc. Royal Soc. of London. Ser. A, Mathematical and Physical Sciences* **192** (1030), 425 (1948).
39. N. Hurley-Walker, J. R. Callingham, P. J. Hancock, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **464** (1), 1146 (2017).
40. H. T. Intema, P. Jagannathan, K. P. Mooley, and D. A. Frail, *Astron. and Astrophys.* **598**, id. A78 (2017).
41. M. Kunert-Bajraszewska, M. P. Gawroński, A. Labiano, and A. Siemiginowska, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **408** (4), 2261 (2010).
42. W. M. Lane, W. D. Cotton, S. van Velzen, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **440** (1), 327 (2014).
43. E. K. Majorova, O. V. Verkhodanov, and O. P. Zhelenkova, *Astrophysical Bulletin* **75** (2), 77 (2020).
44. E. K. Majorova and O. P. Zhelenkova, *Astrophysical Bulletin* **76** (2), 109 (2021).
45. E. K. Majorova, O. P. Zhelenkova, and A. V. Temirova, *Astrophysical Bulletin* **70** (1), 33 (2015).
46. A. P. Marscher and W. K. Gear, *Astrophys. J.* **298**, 114 (1985).
47. M. Massardi, M. López-Cañiego, J. González-Nuevo, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **392** (2), 733 (2009).
48. H. Murakami, H. Baba, P. Barthel, et al., *Publ. Astron. Soc. Japan* **59**, S369 (2007).
49. S. T. Myers, N. J. Jackson, I. W. A. Browne, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **341** (1), 1 (2003).
50. G. Neugebauer, H. J. Habing, R. van Duinen, et al., *Astrophys. J.* **278**, L1 (1984).
51. F. Ochsenbein, P. Bauer, and J. Marcout, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **143**, 23 (2000).
52. C. P. O'Dea, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **110** (747), 493 (1998).

53. C. P. O'Dea, S. A. Baum, and C. Stanghellini, *Astrophys. J.* **380**, 66 (1991).
54. Iu. N. Pariiski, N. N. Bursov, N. M. Lipovka, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **87**, 1 (1991).
55. Y. M. Parijskij, N. N. Bursov, N. M. Lipovka, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **98**, 391 (1993).
56. Y. N. Parijskij and D. V. Korol'kov, *Itogi nayki i tekhniki. Asrofizika i kosmicheskaya fizika* **31**, 73 (1986).
57. Y. N. Parijskij, N. S. Soboleva, O. V. Verkhodanov, et al., *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **40**, 125 (1996).
58. V. V. Pushkarev, E. K. Majorova, and O. V. Verkhodanov, *Astrophysical Bulletin* **74** (4), 337 (2019).
59. N. S. Soboleva, E. K. Majorova, O. P. Zhelenkova, et al., *Astrophysical Bulletin* **65** (1), 42 (2010).
60. Y. V. Sotnikova, T. V. Mufakharov, E. K. Majorova, et al., *Astrophysical Bulletin* **74** (4), 348 (2019).
61. C. Stanghellini, C. P. O'Dea, D. Dallacasa, et al., *Astron. and Astrophys.* **443** (3), 891 (2005).
62. S. Tinti, D. Dallacasa, G. de Zotti, et al., *Astron. and Astrophys.* **432** (1), 31 (2005).
63. S. Tinti and G. de Zotti, *Astron. and Astrophys.* **445** (3), 889 (2006).
64. I. Tornainen, M. Tornikoski, H. Teräsraanta, et al., *Astron. and Astrophys.* **435** (3), 839 (2005).
65. M. Tornikoski, I. Jussila, P. Johansson, et al., *Astron. J.* **121** (3), 1306 (2001).
66. O. V. Verkhodanov, *ASP Conf. Ser.* **125**, 46 (1997).
67. O. V. Verkhodanov, B. L. Erukhimov, M. L. Monosov, et al., *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **36**, 132 (1993).
68. O. V. Verkhodanov, E. K. Majorova, O. P. Zhelenkova, et al., *Astrophysical Bulletin* **70** (2), 156 (2015).
69. O. V. Verkhodanov, E. K. Majorova, O. P. Zhelenkova, et al., *Astronomy Reports* **60** (7), 630 (2016a).
70. O. V. Verkhodanov, D. I. Solovyov, O. S. Ulakhovich, and M. L. Khabibullina, *Astrophysical Bulletin* **71** (2), 139 (2016b).
71. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach, and V. N. Chernenkov, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **58**, 118 (2005).
72. E. L. Wright, X. Chen, N. Odegard, et al., *VizieR Online Data Catalog J/ApJS/180/283* (2009).
73. E. L. Wright, P. R. M. Eisenhardt, A. K. Mainzer, et al., *Astron. J.* **140** (6), 1868 (2010).
74. D. G. York, J. Adelman, J. E. Anderson, Jr., et al., *Astron. J.* **120** (3), 1579 (2000).
75. O. P. Zhelenkova and E. K. Majorova, *Astrophysical Bulletin* **73** (2), 142 (2018).
76. O. P. Zhelenkova, N. S. Soboleva, E. K. Majorova, and A. V. Temirova, *Astrophysical Bulletin* **68** (1), 26 (2013).
77. O. P. Zhelenkova, N. S. Soboleva, A. V. Temirova, and N. N. Bursov, *Astrophysical Bulletin* **72**, 150 (2017).

Comparison of Spectral Properties of Microwave Background Inhomogeneities on Planck Multi-Frequency Maps Near RCR Catalog Sources with Spectral Properties of NVSS and Planck Catalog Sources

E. K. Majorova¹ and O. P. Zhelenkova¹

¹Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnij Arkhyz, 369167 Russia

The study of the relationship of positive fluctuations on Planck frequency maps with the nearest radio sources of the RCR catalog (RATAN Cold Refined) was continued. A linear correlation was found between the spectral indices of radio sources at frequencies of 1.4 and 3.94 GHz and the spectral indices of the nearest spots in the frequency range of 30–217 GHz. The spectral indices of NVSS sources in the range of 150 MHz–3.94 GHz were compared with the spectral indices of the nearest objects of the Planck catalog in the range of 30–217 GHz, between which a linear correlation was also found. The dependences between the spectral indices of RCR sources and the spectral indices of spots and the dependences between the spectral indices of NVSS sources and the objects of the Planck catalog turned out to be identical. The differences in the tangents of the angles of inclination of the approximating lines of these dependencies ranged from 8 to 21%. Combined spectra are constructed for RCR sources and the nearest positive spots, as well as for NVSS sources and the nearest objects of the Planck catalog. It is shown that some of the spots detected near RCR objects are most likely their manifestation in the submillimeter range. In a larger group of spots whose flux densities exceed the flux densities of radio sources extrapolated to the microwave region of the spectrum, these discrepancies may be due to inaccuracy of calibrations or a random coincidence of their coordinates. However, a more detailed study of the combined spectra of NVSS and Planck sources in the range of 70 MHz–857 GHz showed that the shape of the spectra of RCR objects and nearby spots can be explained by the variability of radio sources. The spectrum of averaged temperatures of hot spots detected near RCR sources was constructed, which showed a quantitative excess over those obtained earlier by modeling, which can be explained by the influence of synchrotron background or the contribution of radio sources or their host galaxies to radiation in the submillimeter range. The appearance of the obtained spectrum indicates that most of the spots have an extragalactic nature. The obtained statistics of spectral indices confirm the connection of radio sources with the nearest positive spots on Planck frequency maps. We believe that the contribution of unaccounted radio sources to the foreground may affect the resulting map of the cosmological microwave background.

Keywords: *radio continuum: general—catalogues*