

УДК 524.827-77

МНОГОЧАСТОТНЫЙ ОБЗОР ПО ФОНОВЫМ ИЗЛУЧЕНИЯМ ВСЕЛЕННОЙ. ПРОЕКТ “ГЕНЕТИЧЕСКИЙ КОД ВСЕЛЕННОЙ”. ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

© 2011 Ю. Н. Парийский¹, М. Г. Мингалиев¹, Н. А. Нижельский¹,
Н. Н. Бурсов¹, А. Б. Берлин², А. А. Гречкин¹, В. И. Жаров¹,
Г. В. Жеканис¹, Е. К. Майорова¹, Т. А. Семенова¹, В. А. Столяров¹,
П. Г. Цыбулев¹, Д. В. Кратов¹, Р. Ю. Удовицкий¹, В. Б. Хайкин³

¹ Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 369167 Россия

² Санкт-Петербургский филиал Специальной астрофизической обсерватории РАН

³ Санкт-Петербургский филиал Специальной астрофизической обсерватории РАН

Поступила в редакцию 1 июня 2011 г.; принята в печать 8 июня 2011 г.

В данной работе приведены результаты первого этапа проекта РАН “Генетический код Вселенной” — накопление многочастотных данных в диапазоне волн 1–55 см в 31 частотном канале с предельной статистической чувствительностью, ограниченной шумом фоновых радиоисточников на всех волнах длиннее 1.38 см. Область обзора: $00^h < RA < 24^h$, $40^\circ 30' < DEC < 42^\circ 30'$. Уточняются научные цели проекта с учетом современных предложений по использованию данных о фоновых излучениях Вселенной в радиодиапазоне для создания единой физической теории.

На основании экспериментальных данных, полученных на радиотелескопе РАТАН-600, уточнен вклад в шум Вселенной основных “экранов” между наблюдателем и эпохой формирования реликтового фона ($z = 1100$). Представлены экспериментальные данные по шуму синхротронного и свободносвободного излучения на интересных для анизотропии реликтового фона масштабах и предсказан их вклад в экспериментах ближайших лет на миллиметровых длинах волн. Показано, что роль дипольного радиоизлучения пылевых наноструктур типа фуллеренов мала. Даны наиболее точные оценки роли фоновых радиоисточников с инверсионными спектрами и показано, что они не являются ощутимой помехой в экспериментах. Оценены средние спектральные индексы предельно слабых радиоисточников NVSS- и FIRST-каталогов. Данные по “насыщению” на всех волнах позволили ограничить Сюняева-Зельдовича шум (SZ-шум) и получить независимые оценки средней температуры неба от источников, значительно слабее, чем в NVSS-каталоге. Эти оценки противоречат существованию мощного внегалактического синхротронного фона связанного с радиоисточниками. Обнаружена ощутимая “квадрупольная” анизотропия в распределении спектрального индекса синхротронного излучения Галактики, которая должна учитываться при оценке поляризации анизотропии реликтового фона на малых l . Все полученные результаты сопоставлены с зарубежными данными последних лет.

Ключевые слова: *радиоисточники*

1. ВВЕДЕНИЕ

Центральной задачей проекта “Генетический код Вселенной” [1, 2], являлось отделение многочисленных мешающих фоновых излучений от анизотропии реликтового фона с использованием многочастотности и высокого разрешения к фоновым излучениям РАТАН-600. Наиболее полно проблема этих фоновых излучений была сформулирована М. Тегмарком в [3]. К началу реализации проекта неопределенность в фоновых шумах составляла более порядка по амплитуде шума и, следовательно, более двух порядков по спектру мощности. Накопленные к настоящему времени

данные на РАТАН-600 позволили значительно снизить неопределенность по основным видам мешающих фоновых излучений. Ниже приведены результаты по частотно-зависимым фоновым излучениям и по шуму от дискретных радиоисточников. Некоторые результаты по данной тематике уже представлены в публикациях [4–10].

Сводка М. Тегмарка [3] была принята за основу при планировании экспериментов по фоновым излучениям на РАТАН-600.

2. НАБЛЮДЕНИЯ

2.1. Подготовка инструмента к обзору фонового излучения Вселенной

Кратко перечислим основные проведенные работы с учетом опыта первых экспериментов по фоновым излучениям на РАТАН-600 в 70-х и 80-х годах:

- вместо пробных сетчатых экранов для снижения шумов антенны были спроектированы, изготовлены и установлены достаточно точные “закрылки” внизу и наверху панелей общей площадью около 10000 м². Одновременно это расширило частотный диапазон радиотелескопа РАТАН-600, по крайней мере, до длины волны 50 см. Создан радиометр для этого диапазона;
- для повышения КПД радиотелескопа была проведена полная переюстировка всех 1000 панелей основной поверхности РАТАН-600. Ошибки поверхности элементов были снижены втрое, до 0.2–0.3 мм, что привело к уменьшению потерь на порядок на рассеяние на предельно короткой длине волны, 1 см;
- улучшена поверхность вторичных зеркал до 0.3–0.4 мм. Это привело к снижению эффективно действующей погрешности, что сопоставимо с погрешностями панелей основной поверхности;
- для борьбы с помехами все дециметровые каналы были разбиты на несколько (до 8) подканалов, что облегчило накопление достаточно свободных от помех данных наблюдений;
- полностью реконструированы рельсовые пути для перемещения вторичных зеркал — деревянные шпалы заменены на бетонные с глубокими фундаментами. Это открывает новые возможности наблюдений на коротких длинах волн радиотелескопа РАТАН-600;
- осуществлен переход от “однорупорных” классических радиометров к многорупорным (аналог ССD-матрицам в оптике). Освоено в реальных наблюдениях фокальный комплекс из 16 НЕМТ-усилителей с 32-рупорными облучателями на предельной длине волны радиотелескопа РАТАН-600, 1 см (матричный радиометрический комплекс МАРС-3);
- исследованы методы борьбы с атмосферным шумом и найдены простые решения для устранения поляризационных инструментальных эффектов;

- создана новая гибкая система сбора и накопления данных, позволяющая вести их обработку с нужной точностью, что позволило снизить многие инструментальные погрешности;
- проведено моделирование эксперимента по глубоким фоновым исследованиям на радиотелескопе РАТАН-600 и оценены требования к их объему для решения основных космологических задач;
- создано математическое обеспечение, позволяющее проводить глубокую обработку данных радиотелескопа РАТАН-600;
- уточнена двумерная структура диаграммы направленности радиотелескопа РАТАН-600, позволяющая моделировать фоновые эксперименты с учетом основных зарубежных данных;
- разработана и внедрена в круглосуточную эксплуатацию высокоточная система автоматического горизонтирования облучателя типа 1;
- заменены на 3-х облучателях устаревшие приводы постоянного тока на современные высокоточные цифровые инверторные приводы;
- проведены работы по подавлению помех в дециметровом диапазоне длин волн методом частотно-временного помехоподавления (метод подробно описан в [11]).

2.2. Накопленный материал

Наблюдения проводились на северном секторе РАТАН-600 с 1998 по 2009 гг. на частотах от 0.55 до 30.0 ГГц (более детально указано в Таблице).

Область неба обзора определялась из условия малого значения аберраций (вблизи местного Зенита), наличием калибровочного объекта малого углового размера (3С84) и оптимальной шириной по склонению (оптимум между временем накопления на элемент разрешения и статистическим шумом, “cosmic variance”). Выбранная нами ширина около 2 градусов позволяет надеяться на удовлетворительный результат для достаточно малых угловых масштабов, наиболее интересных для данного проекта ($l > 1000$).

Для обработки данных использовался штатный пакет FADPS [12] и Origin-8.

В колонках указаны: 1 — рабочая длина волны; 2 — чувствительность радиометра при времени экспозиции 1 секунда на каждом частотном канале; 3 — полное число дней (суток) наблюдений на всех каналах на данной длине волны и на всех сечениях по склонению (16 разрезов через 6 мин.

Таблица. Данные наблюдений

λ , см	σ , мК	N, дни	l_{\max} , $2\pi D/\lambda$	σN , мК	PS, мК	PSMHW, мК	$l_{\text{кnee}}$	Pol, Stoks
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.0	5.4	4800	2.8×10^5	0.24	2.57×10^{-3}	2.57×10^{-4}	600	I, Q
1.0	6	1710	2.8×10^5	0.24	2.57×10^{-3}	2.57×10^{-4}	600	I, Q
1.38	3.5	719	2×10^5	0.51	6.77×10^{-3}	6.77×10^{-4}	1000	I
2.7	3	754	10^5	0.31	5.07×10^{-2}	5.07×10^{-3}	100	I
3.9	3	752	7.2×10^4	0.26	0.153	0.0153	30	I
6.25	2.2	510	4.6×10^4	0.15	0.613	0.0613	10	L
6.25	2.2	534	4.5×10^4	0.15	0.644	0.0644	10	R
7.6	2	151	3.7×10^4	0.12	1.13	0.113	9	L
13.0	22	174	2.2×10^4	1.0	5.66	0.566	1	L
13.01	22	678	2.2×10^4	1.0	5.67	0.567	1	L
12.27	22	364	2.3×10^4	1.1	4.76	0.476	1	L
12.53	22	300	2.3×10^4	1.1	5.06	0.506	1	L
12.79	8	587	2.2×10^4	0.38	5.39	0.539	1	L
13.07	22	685	2.2×10^4	1.0	5.75	0.575	1	L
13.36	22	685	2.1×10^4	1.0	6.14	0.614	1	L
13.67	22	686	2.1×10^4	1.0	6.58	0.658	1	L
13.99	22	565	2×10^4	1.0	7.05	0.705	1	L
31.2	60	39.2	9.1×10^3	1.8	78.2	7.82	1	L
29.78	60	519	9.5×10^3	1.9	68.0	6.8	1	L
30.72	15	520	9.2×10^3	0.46	74.6	7.46	1	L
33.15	60	102	8.5×10^3	1.8	93,8	9.38	1	L
45.32	75	106	6.2×10^3	1.9	240	24.0	1	L
46.44	75	46	6.1×10^3	1.9	258	25.8	1	L
47.62	75	519	5.9×10^3	1.9	278	27.8	1	L
48.86	75	520	5.8×10^3	1.8	300	30.0	1	L
50.17	25	51	5.6×10^3	0.61	325	32.5	1	L
51.55	75	53	5.5×10^3	1.8	353	35.3	1	L
53.0	75	54	5.3×10^3	1.8	383	38.3	1	L
54.54	75	116	5.2×10^3	1.7	418	41.8	1	L

дуги); 4 — предельное разрешение на данной длине волны в пространстве сферических гармоник в спектре мощности (C_l), определяемое разрешением РАТАН-600 ($2\pi D/\lambda$); 5 — чувствительность по белому шуму, накопленная (для примера) на масштабах диаграммы РАТАН-600 на данной длине волны на одном сечении по склонению; 6 — оценка шума от источников (насыщение) без обработки данных, с учетом далеких источников; 7 — оценка шума карты неба (и одномерных кривых) при

выделении только деталей размером в полуширину диаграммы; 8 — оценка роли атмосферного шума по данным РАТАН-600 по параметру $l_{\text{кnee}}$ (масштаб, где шум атмосферы начинает доминировать над шумом радиометра) [8]; 9 — регистрируемый входным трактом параметр Стокса поляризации (I — интенсивность, Q — параметр Стокса для линейной поляризации, L и R — левая и правая круговая поляризация, которые для неполяризованного сигнала равны интенсивности).

3. СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Центральной проблемой для поляризационных наблюдений является вклад синхротронного излучения, а для измерения шума Вселенной на высоких мультиполях — вклад от дискретных радиоисточников и неопределенный вклад от фуллеренов [13–15].

Знание этих фоновых излучений важно не только для правильного учета при редукции данных по анизотропии реликтового излучения, но и для оценки их роли в поляризационных исследованиях ближайших лет, которые являются основными в поиске реликтовых гравитационных волн (рассеяние фотонов на гравитационных волнах приводит к возникновению В-моды в поляризации). Некоторые полученные на РАТАН-600 результаты по синхротронному излучению опубликованы ранее [9].

Все существующие оценки показали преобладание синхротронного шума Галактики над свободно-свободным шумом и над излучением пыли на длинах волн больше 4 см. Поэтому свойства этого шума изучались по разрезу Галактики в RZF (Ratan Zenith Field) обзоре на волнах 7.6 см, 13 см, 31 см, 50 см [9, 10]. Разрезы на этих частотах сравнивались с известными зарубежными данными на более длинных волнах (прежде всего на длине волны 74 см [16, 17] и с принятыми для синхротронного шума данными проекта WMAP на волнах 1 см и короче). На всех волнах РАТАН-600 полученные данные на склонении объекта 3С84 были разбиты на две группы. Достоверность данных оценивалась по сопоставлению полусуммы с полуразностью данных.

Температура неба минимальна в области прямых восхождений 9–17 часов, соответствующих наиболее высоким Галактическим широтам ($b_{II} > 40^\circ$). Предельное разрешение составляет около 2 мин. дуги ($l \sim 6000$). После абсолютной привязки к шкале температур методом “TT-plot” по данным Боннского обзора на волне 74 см [16, 17] можно оценивать вариации спектрального индекса вдоль всей полосы RZF-обзора. Нами получены оценки двухчастотного спектрального индекса по данным на волне 7.6 см (RZF) и 74 см [9, 16, 17]. Крутизна спектра является функцией не только Галактической широты, но и долготы. В литературе обсуждается эффект “квадрупольной асимметрии” свойств Галактики в Галактических координатах по ряду параметров. Этот эффект получен и по спектральному индексу нетеплового излучения (квадрант QI отличается от квадранта QII) [9, 10].

Чувствительность RZF-обзора показала, что реальный шум синхротронного излучения Галактики значительно ниже предсказанного М. Тегмарком “пессимистического варианта” [3] (Рис. 1).

Средний спектральный индекс по яркостной температуре около 3.0 ± 0.23 , с вариациями от 2.3

на низких Галактических широтах, до 3.4 на высоких широтах. Вариации спектрального индекса доминируют на масштабах в несколько часов, но на масштабах порядка горизонта на момент рекомбинации вариации практически равны нулю.

Многочастотность RZF-обзора в принципе позволяет построить зависимость яркости фона от частоты в любой точке обзора. В виде примера показана попытка построить такой спектр для масштаба $l = 200$ для нескольких соседних сечений по склонению (Рис. 2).

3.1. Синхротронный фон Галактики и анизотропия реликтового фона

Принято считать, что в первом приближении синхротронный шум зависит от масштаба в C_l -пространстве как l^3 , а от частоты как $(\nu^3)^2 = \nu^6$. На больших масштабах он абсолютно доминирует, но на малых масштабах (больших l) надо учесть шум фоновых радиоисточников. Учет фоновых радиоисточников в данных RZF-обзора пока наиболее полно сделан на центральной длине волны эксперимента 7.6 см и на наиболее чувствительных к дискретным радиоисточникам масштабах, сравнимых с шириной диаграммы (l' или $l = 6000$). Верхнюю границу синхротронного шума, ожидаемого на основных частотах, ведущихся и планируемых космических экспериментов, можно оценить по данным RZF-обзора значительно точнее, чем это было сделано М. Тегмарком (Рис. 3).

Как видно из Рис. 3, наиболее глубокие данные на масштабах горизонта на момент рекомбинации ($l \sim 200$) получены на дециметровых длинах волн RZF-обзора. Кроме ожидаемого синхротронного шума приведены и оценки шума теплового радиоизлучения ионизированного газа. Горизонтальные линии — теоретические оценки поляризации анизотропии реликтового фона, поляризации SZ и ожидаемый уровень “спектрального шума”, возникающего после эпохи вторичной ионизации.

4. ФОНОВЫЕ РАДИОИСТОЧНИКИ

Неопределенность в шуме от фоновых радиоисточников на главных волнах экспериментов по реликтовому излучению (1 см — 1 мм) является основной и без ее учета невозможно оценивать анизотропию реликтового фона. Остается сложной проблема исследования роли фоновых радиоисточников на больших значениях l , так как отсутствуют высокочувствительные поисковые обзоры радиоисточников. Для обзоров неба с чувствительностью, достаточной для регистрации радиоисточников NVSS-каталога с нормальными спектрами (которых большинство), нужно потратить время, близкое ко времени существования цивилизации.

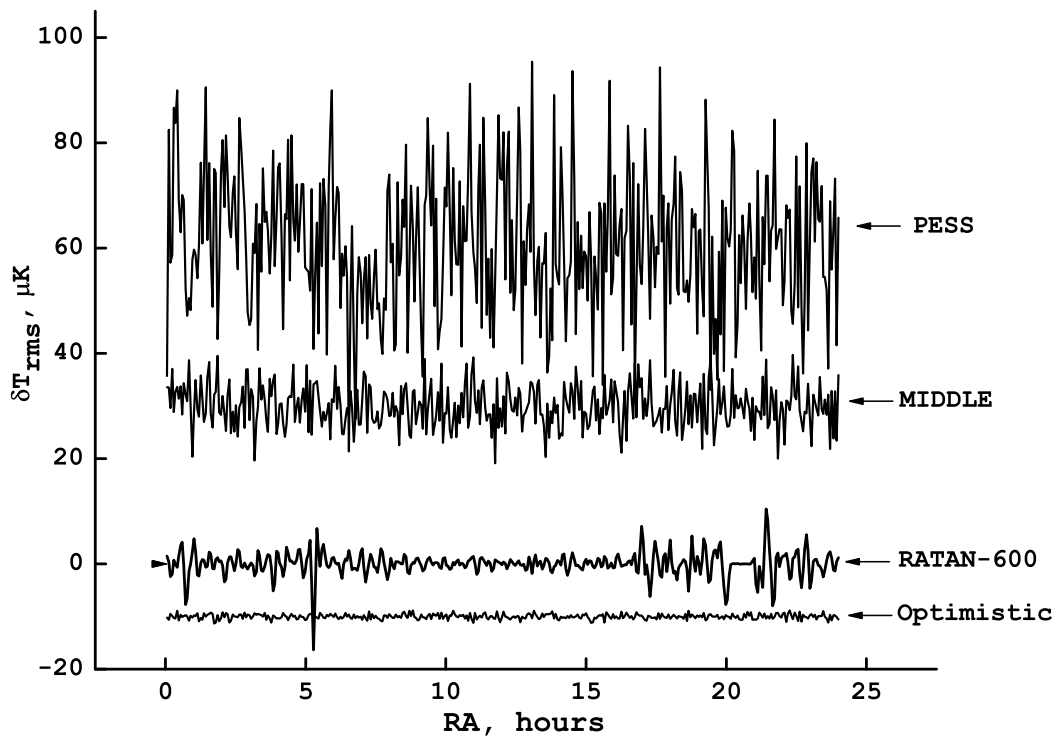


Рис. 1. Предсказания М. Тегмарка [3] и RZF-обзор. На высоких Галактических широтах (7ч–17ч) реальные шумы Галактики близки к “оптимистическому” варианту М. Тегмарка даже без учета шумов радиометра и фоновых радиисточников.

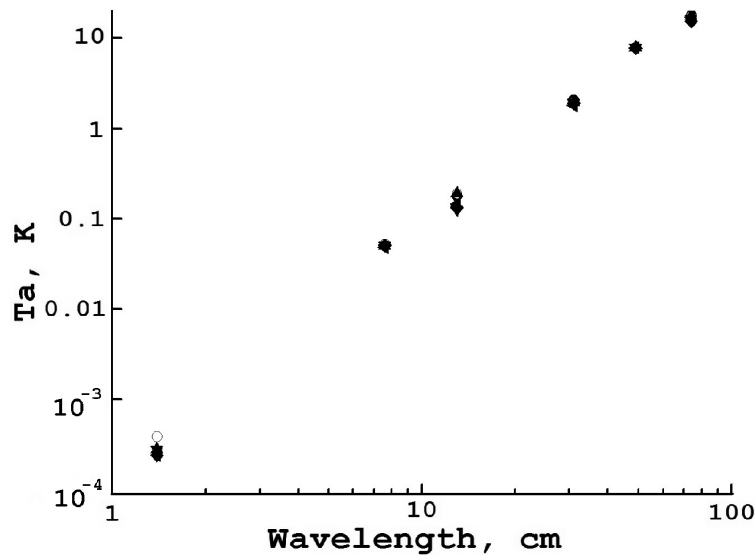


Рис. 2. Пример построения “пиксельного” спектра фонового излучения на масштабах соответствующих $l = 200$. Разные значки показывают соседние сечения. Оценки для близких по склонению сечений практически совпадают. Показана и точка на длине волны 74 см по данным Боннского обзора [16, 17].

Рон Экерс это демонстрирует простым случаем наблюдений на разных длинах волн с одним и тем же радиотелескопом с близкой чувствительностью радиометров [18]. При переходе к более короткой длине волны (например, от 21 см к 1 см) для компенсации падения плотности потока нужно потра-

тить в 400 раз больше времени, а для обзора той же области неба с диаграммой более узкой еще в 400 раз больше времени. Единственный полный обзор неба проведен на длине волны 6 см с чувствительностью около 20 мЯн (GB6), что в сотни раз больше ожидаемой плотности потока от основной

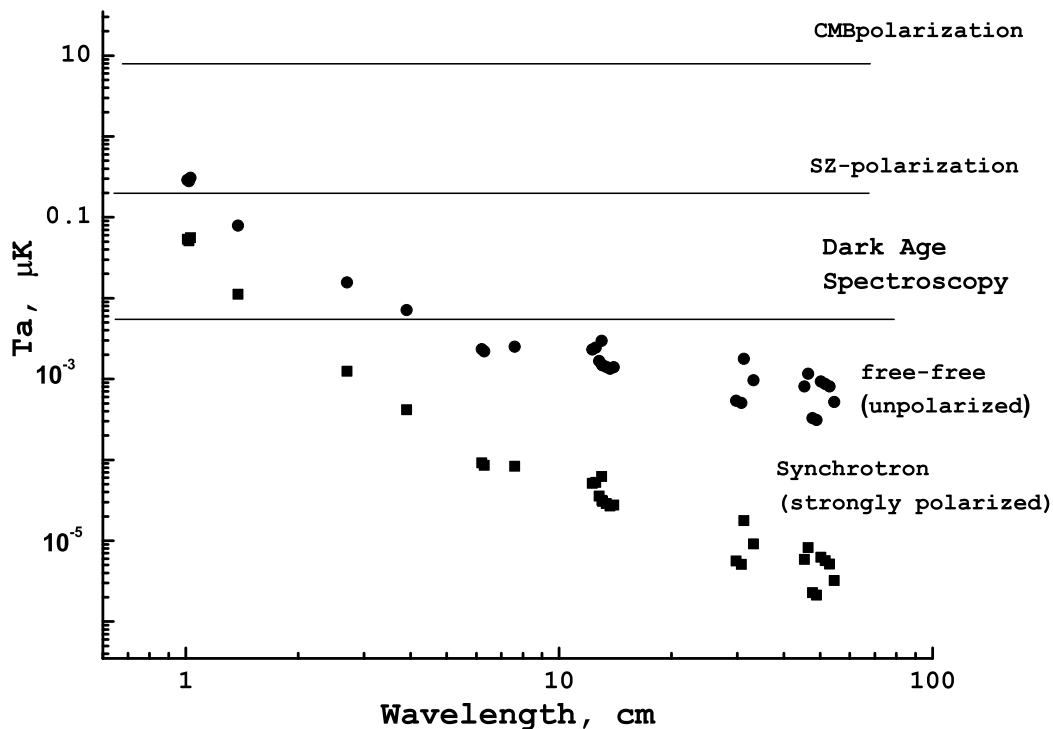


Рис. 3. Простая экстраполяция чувствительности RZF-обзора по белому шуму на масштабах соответствующих $l = 200$ на частоты наиболее чувствительных комплексов эксперимента Planck (HFI, 21.7 ГГц), пользуясь зависимостью как куб частоты. Ось ординат — шум на частоте 21.7 ГГц в мкК, по оси абсцисс — рабочие волны RZF-обзора. Видно, что белый шум не ограничивает исследования фоновой поляризации в миллиметровом диапазоне длин волн (кружочками показаны данные для свободно-свободного излучения, квадратиками — синхротронного излучения).

массы NVSS-объектов. Чувствительность RZF-обзора по точечным радиисточникам на порядок выше GB6. Целью исследования радиисточников RZF-обзора являлось:

- Уточнение доли NVSS-объектов с инверсионными спектрами, сложными для текущих и будущих экспериментов по реликтовому фону, и уточнение их среднего спектра в неисследованных пока областях плотностей потока в сантиметровом диапазоне длин волн.
- Поиск новой популяции радиисточников, отсутствующих в предельно глубоких обзорах прежних лет.

Большая собирающая площадь РАТАН-600 (примерно в 1000 раз большая, чем использована М. Тегмарком при моделировании шума “насыщения” в космических экспериментах по изучению реликтового фона) и высокое угловое разрешение (примерно в 100 раз большее, чем в космических экспериментах по изучению реликтового фона) позволило значительно продвинуться в понимании роли фоновых радиисточников по сравнению с эпохой создания. Чувствительность RZF-обзора в

сантиметровом диапазоне длин волн при осреднении сотен суточных разрезов неба выше прежних наблюдений для больших областей неба.

Шум от этих объектов при свертке с двумерной диаграммой РАТАН-600 на всех волнах определяет предел чувствительности радиометров и независимости накопленных данных.

Шум “насыщения” доминирует на масштабах порядка диаграммы одного элемента по вертикали и может быть снижен редукцией данных. Стандартный прием — дифференцирование по времени массивов данных на временных масштабах около времени прохождения точечного радиисточника через диаграмму. Более глубокая фильтрация шума насыщения происходит при использовании второй производной по времени (“Mexican Hat”, МНВ) [19]. Этот метод широко применяется для фильтрации точечных источников в различных космологических экспериментах, таких как WMAP и Planck. Для диаграммы РАТАН-600 в RZF-обзоре, с ядром малого размера и с широким фоном, МНВ-обработка практически исключает шум от источников вне полосы обзора по полуширине ядра диаграммы по склонению. Основная энергия шума насыщения определяется источниками, попадающими в диаграмму одного элемента поверхности, а не в

гауссовую ядерную часть диаграммы РАТАН-600. Она и подавляется МНВ-фильтрацией.

На Рис. 4 и 5 показан результат моделирования кривой прохождения NVSS-неба в RZF-обзоре после обработки МНВ-фильтром и моделирование кривой прохождения без обработки МНВ-фильтром NVSS-обзора, где оставлены только источники в узкой полосе по склонению шириной равной ядру диаграммы по ее полуширине (± 2 мин. дуги на длине волны 7.6 см). Получено около 10 источников на 20 минут или 720 на 24 часа выше уровня NVSS-шума (confusion).

Остаточный шум (Рис. 5) соответствует вкладу только от NVSS-объектов в полосе полуширины ядра диаграммы по склонению.

На Рис. 6 приведен участок разреза неба по данным 400 суточных наблюдений на центральной волне эксперимента 7.6 см, отфильтрованный методом МНВ. Видно, что одиночные источники обнаруживаются до уровня около 2 мЯн, что на порядок ниже уровня GB6. Практически не обнаруживаются радиоисточники, отсутствующие в NVSS-каталоге на длине волны 21 см.

Устранение вклада от источников вне ядра центральной диаграммы снизило шум “насыщения” в несколько раз. Полуразность 200-суточных массивов близка к чувствительности радиометров.

Радионебо на сантиметровых длинах волн выглядит почти как и на дециметровых (Рис. 7).

На Рис. 8 показана количественная корреляция для этого участка неба (TT-plot).

В работе определены спектральные индексы всех деталей RZF-обзора по сопоставлению с данными NVSS-каталога. Получено, что 4.8% — популяция объектов с инверсионными спектрами, 14% — ультра-крутыми спектрами. Доминируют объекты со спектральными индексами $0 < \alpha < -1$ ($P \sim \nu^{-\alpha}$). В этом диапазоне доминируют нормальные спектры, с небольшой дисперсией относительно среднего (0.76 ± 0.06), что показано ниже (Рис. 9) для популяции слабых NVSS-радиоисточников в полосе RZF-обзора.

Если удалить все видимые объекты на уровне 3σ , остается шум 0.3 мК от шума слабых неотожествленных фоновых источников и от шума радиометра (Рис. 10).

Вклад шума радиометра (как и других случайных шумов) мы оценили по шуму полуразности двух 200-суточных массивов RZF-обзора. Этот шум выделяется и на автокорреляционной функции 400-суточного массива данных в связи с различием радиуса корреляции “белого шума” (он δ -коррелирован) и шума всех объектов в дальней зоне радиотелескопа (радиус корреляции не менее ширины диаграммы радиотелескопа). Этот шум оказался малым.

Вклад радиоисточников слабее 3σ можно оценивать корреляционной методикой, используя большое число независимых пикселей (элементов разрешения). На Рис. 11 приведены некоторые результаты.

Корреляционный анализ даже на длине волны 1.38 см показывает некоторую (на уровне 5σ) корреляцию между независимыми массивами данных. Можно показать, что при 450000 точках в массивах это говорит о наличии коррелированного сигнала на уровне в десятки мкЯн, что соответствует источникам с нормальными спектрами с плотностью потока около 500 мкЯн на длине волны 21 см.

Чувствительность корреляционного анализа оценивается по стандартным формулам типа [20]:

$$r = \sum xy / n\sigma_x\sigma_y, \quad \sigma_r = (1 - r^2) / n^{1/2}, \quad r \ll 1,$$

где r — коэффициент корреляции, $\sum xy$ — сумма парных произведений сравниваемых массивов (именно эта величина отложена на оси ординат на Рис. 11), n — число независимых точек в массивах данных, σ_r — погрешность в оценке коэффициента корреляции.

Итак, глубокий RZF-обзор продемонстрировал, что на всех волнах сантиметрового диапазона есть шум от дискретных радиоисточников на уровне долей мЮ. Значительно сложнее ответить на вопрос о природе этой популяции радиоисточников. Первая гипотеза — это шум слабых источников NVSS-каталога. Однако оценки объектов с нормальными спектрами порядка $0.7-0.8$ ($P \sim \nu^{-\alpha}$) показали, что этих источников недостаточно. Несколько ближе к реальным наблюдениям оказались модели RZF-наблюдений при использовании не каталога, а карт NVSS-неба, куда входят значительно более слабые объекты. По-видимому, вклад инструментального шума на этих картах не слишком велик. Необъясненным является некоторый шум на уровне $0.3-0.5$ мЯн на длине волны 7.6 см.

Некоторое уточнение состава остаточного шума оказалось возможным сделать сравнением модельного шума RZF-эксперимента в двух вариантах: путем сглаживания двумерной диаграммой формального каталога NVSS и прямых карт NVSS-неба. В первом случае в модели участвуют только объекты с сигналами 5σ , во втором — все вплоть до уровня “насыщения” в картах NVSS-неба. Во второй модели шум, как и ожидалось, больше чем в первой. Однако мы обнаружили неотожествленную пока компоненту остаточного шума на уровне $0.1-0.2$ мК ($0.3-0.6$ мЯн).

Популяции сильных и слабых радиоисточников различаются по статистике спектральных индексов. Это было замечено в обзорах предыдущих лет [21–24] и по сопоставлению обзора северного неба [23] с RZF-данными. В области крутых спектров доминируют сильные радиоисточники, в области плоских спектров — слабые [5, 6].

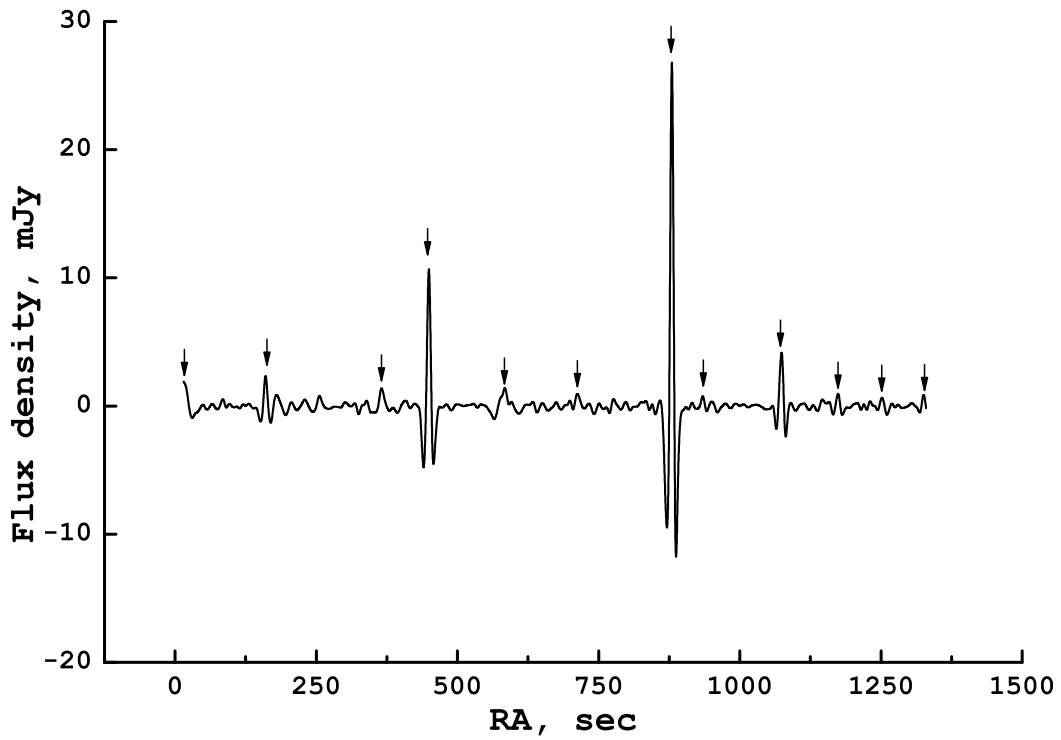


Рис. 4. Сглаживание двумерной диаграммой на длине волны 7.6 см NVSS-карт в полосе RZF-обзора с последующей фильтрацией MHW без учета всех других видов шумов. Стрелками показаны радиоисточники.

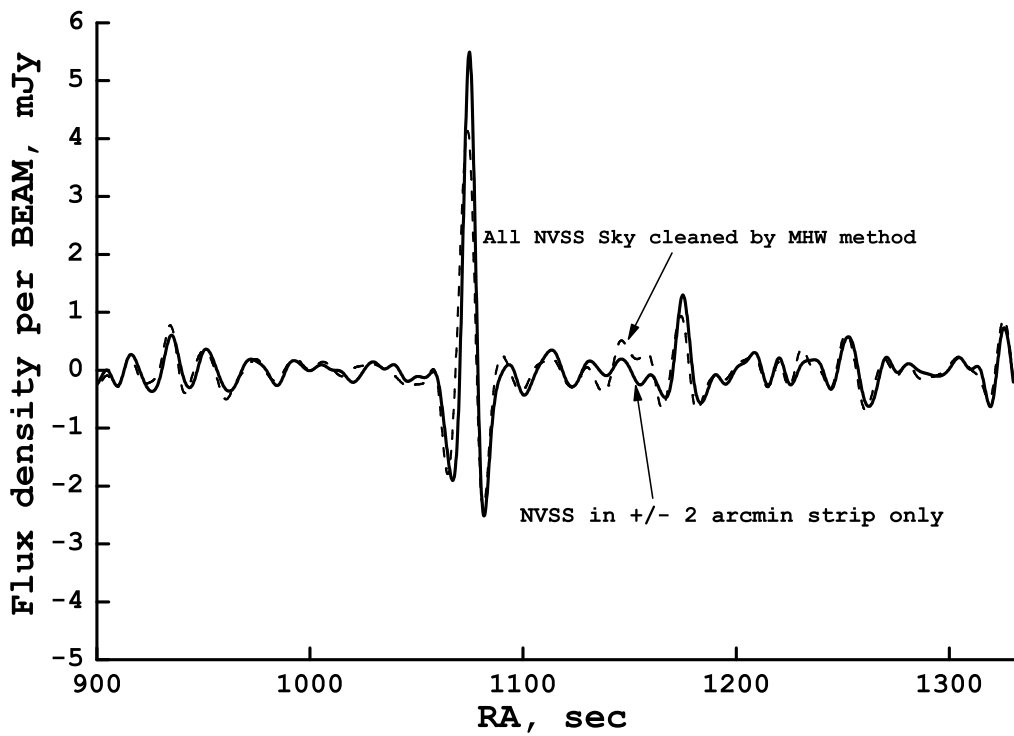


Рис. 5. Устранение шума фоновых радиоисточников, находящихся вне полуширины ядра диаграммы, методом MHW-фильтрации.

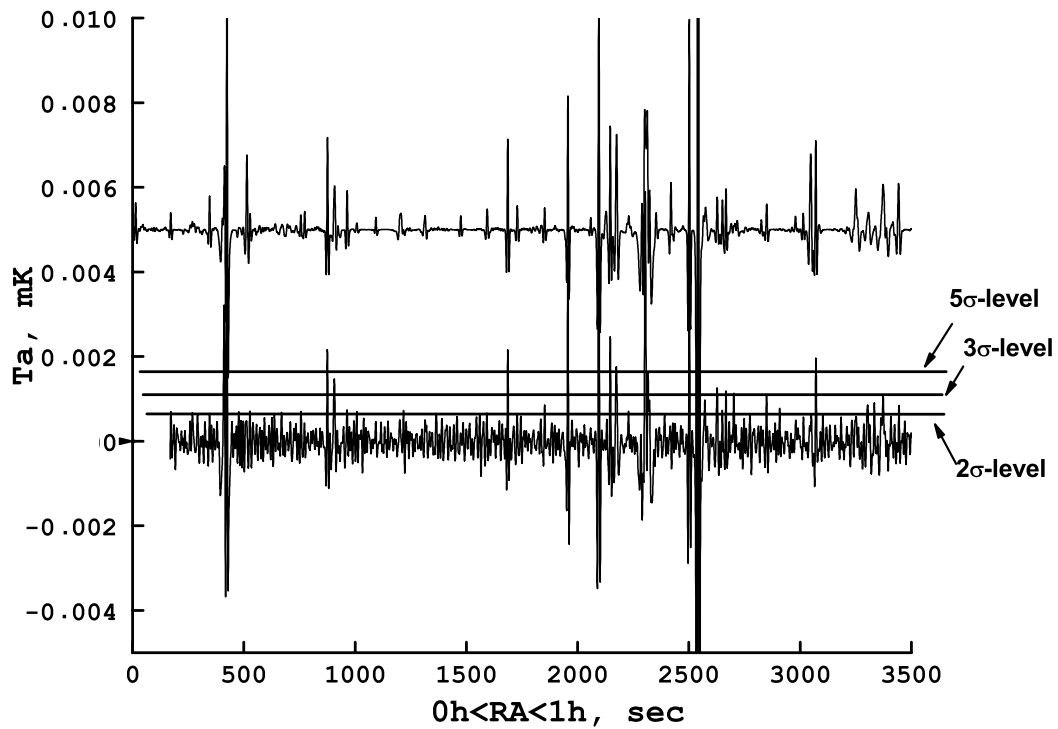


Рис. 6. Демонстрация эффективности фильтрации шумов фоновых источников по области неба с накоплением около 400 суточных данных: верхняя кривая — NVSS-модель RZF-обзора, нижняя — реальные наблюдения. Видно, что нет новых объектов даже на уровне 3σ .

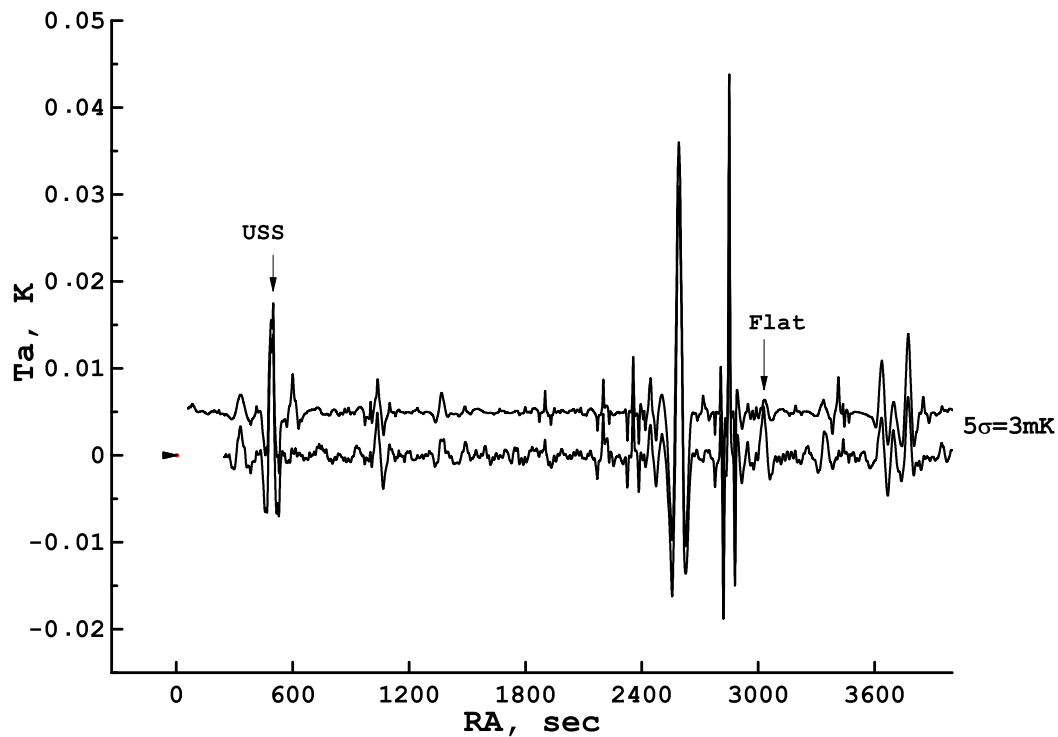


Рис. 7. Сравнение модельного разреза неба по данным NVSS (верхняя кривая) с разрезом на длине волны 7.6 см для центрального сечения в интервале $0h < RA < 1h$ (нижняя кривая). Осреднено 400 дней наблюдений.

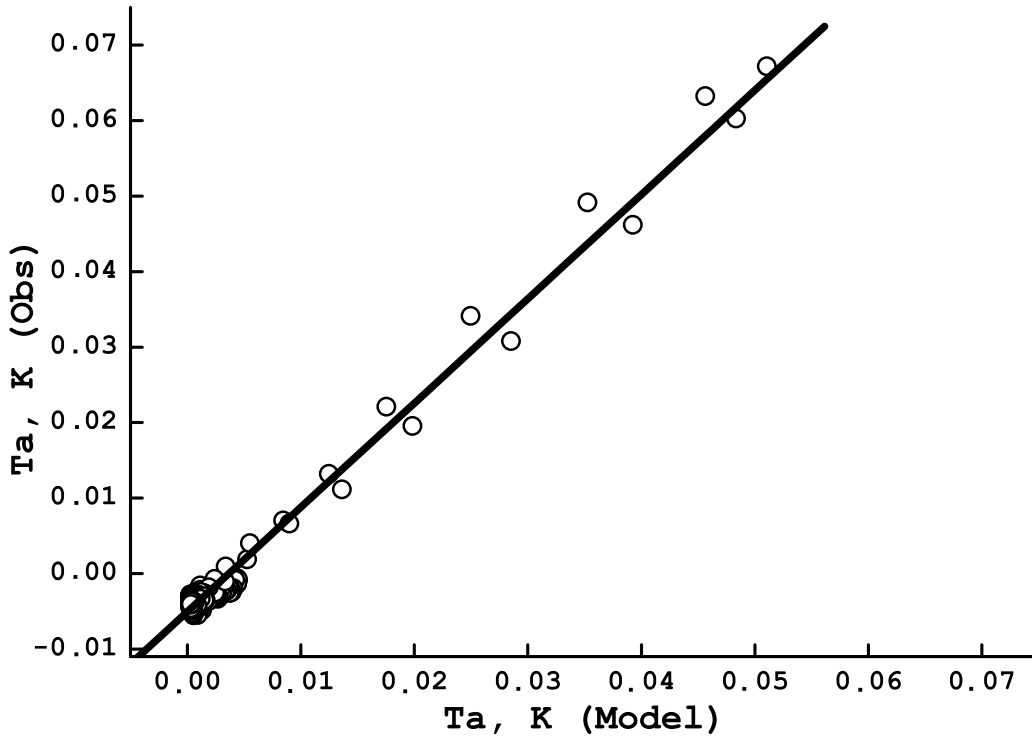


Рис. 8. Антенная температура в каждой точке по прямому восхождению в наблюдениях на волне 7.6 см по сравнению с модельными предсказаниями по данным NVSS-каталога для всех деталей сильнее 1 мК. Высокая корреляция в этой области неба говорит о малой дисперсии двухчастотных спектральных индексов.

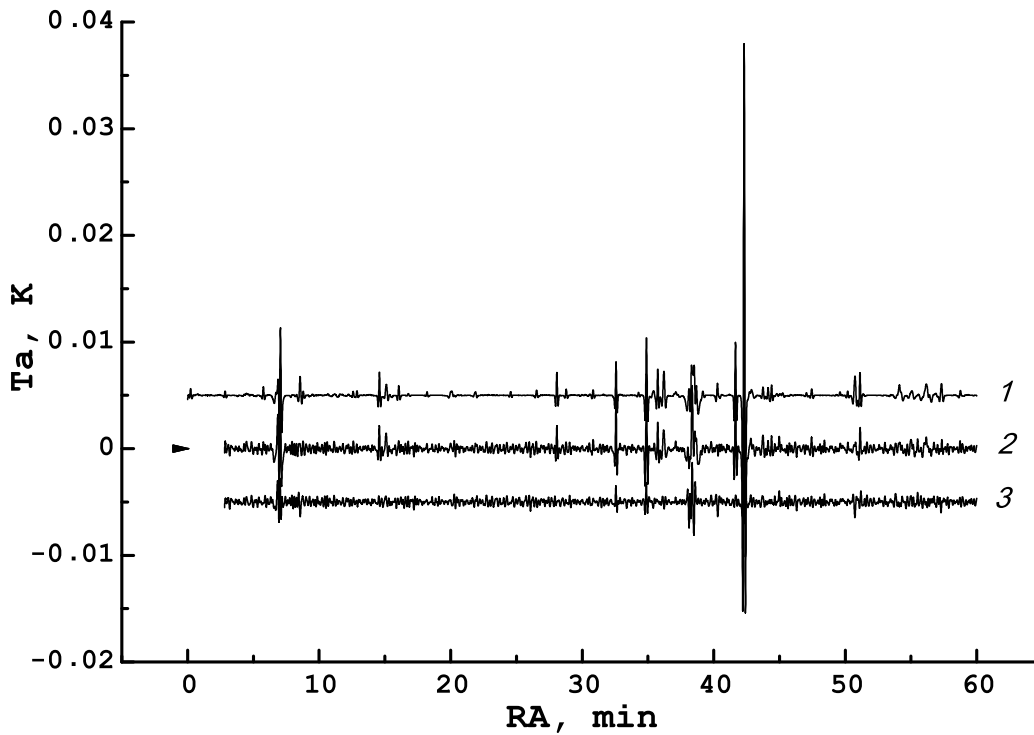


Рис. 9. Чистка данных RZF-обзора от объектов NVSS-обзора: 1 — NVSS-модель неба, 2 — RZF наблюдения на волне 7.6 см, 3 — “очищенные” данные. Остаются только редкие объекты с инверсионными и ультра-крутыми спектрами.

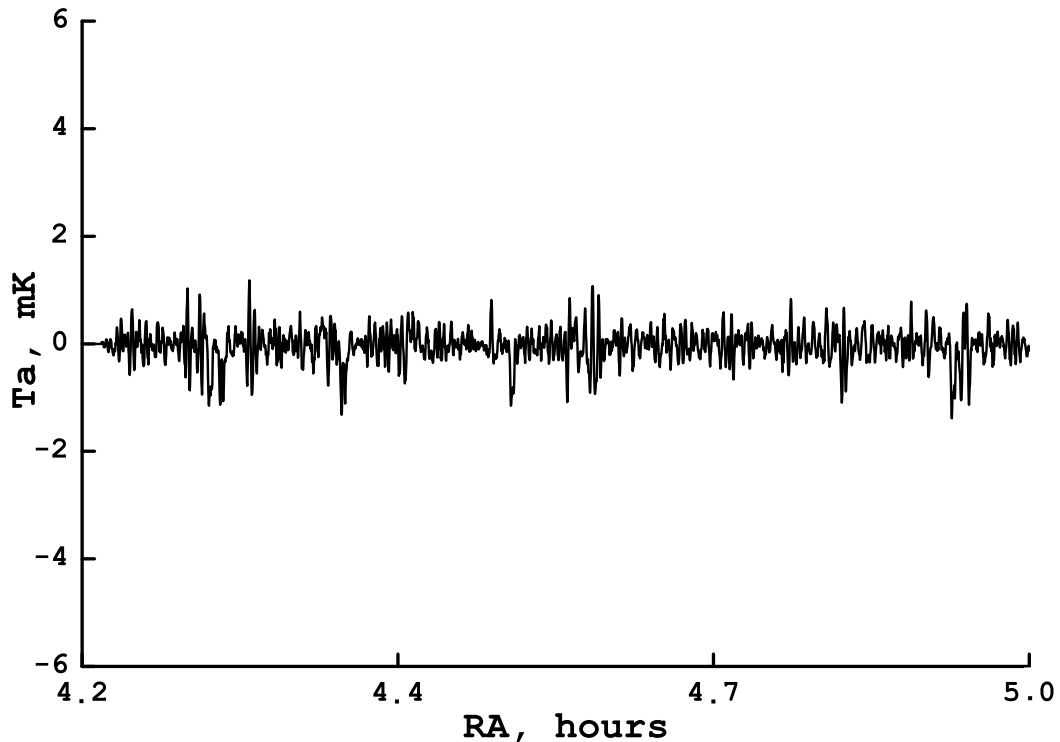


Рис. 10. Пример остаточного шума после удаления по уровню трех источников на осредненной за 400 суток кривой прохождения RZF-области через диаграмму PATAH-600 на центральной волне 7.6 см после применения MHW-фильтрации. Это — шумы радиометра, фоновых дециметровых радиоисточников, не попавших в NVSS-каталог, “новая популяция” радиоисточников и мелкомасштабная анизотропия неба.

В поле RZF-обзора попало большое число NVSS- и FIRST-объектов, и была сделана оценка двухчастотных спектральных индексов (21 см – 7.6 см).

Практически для всех экспериментов сложным является трудно учитываемые эффекты наблюдательной селекции — на коротких волнах чувствительность много ниже требуемой для регистрации объектов, видимых на дециметровых длинах волн с нормальными (крутыми) спектрами. Метод “фамильного портрета” позволяет избежать эти ограничения и провести глубокие исследования по статистике спектральных индексов популяции объектов, недоступных обычным наблюдениям. Этот метод свободен от шума “насыщения” и в $N^{1/2}$ чувствительнее (N — число объектов в выделенной группе радиоисточников с известными координатами). Он используется и другими группами (например, “Stack imaging”)[25].

Применение метода “фамильного портрета” для NVSS-объектов с различными плотностями потоков показано на Рис. 12.

На рисунке виден ясный тренд по некоторому уплощению спектров при переходе к более слабым радиоисточникам. Завал на предельно слабых потоках имеет методический характер, так как при

переходе к еще более глубоким каталогам (FIRST-каталог) он исчезает.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Главные выводы исследования фонового излучения неба с чувствительностью около 1 мК в широком диапазоне волн:

Атмосферный шум. На основании не имеющего аналога по объему многочастотных суточных записей атмосферного излучения оценена область пространственного спектра (l), где шум атмосферы менее чувствительности радиометров в RZF-обзоре, и предложены методы расширения этой области. Определена методика практически полного устранения шума атмосферы на всех масштабах при поляризационных наблюдениях реликтового фона [8].

Синхротронный шум Галактики. Накоплены данные по анизотропии синхротронного излучения в области RZF-обзора с чувствительностью и разрешением в порядка 100 раз более высоким, чем в основных модельных картах синхротронного излучения, использовавшихся ранее при интерпретации экспериментов по реликтовому фону.

В области RZF-обзора получены данные о пространственных вариациях спектра синхротронного

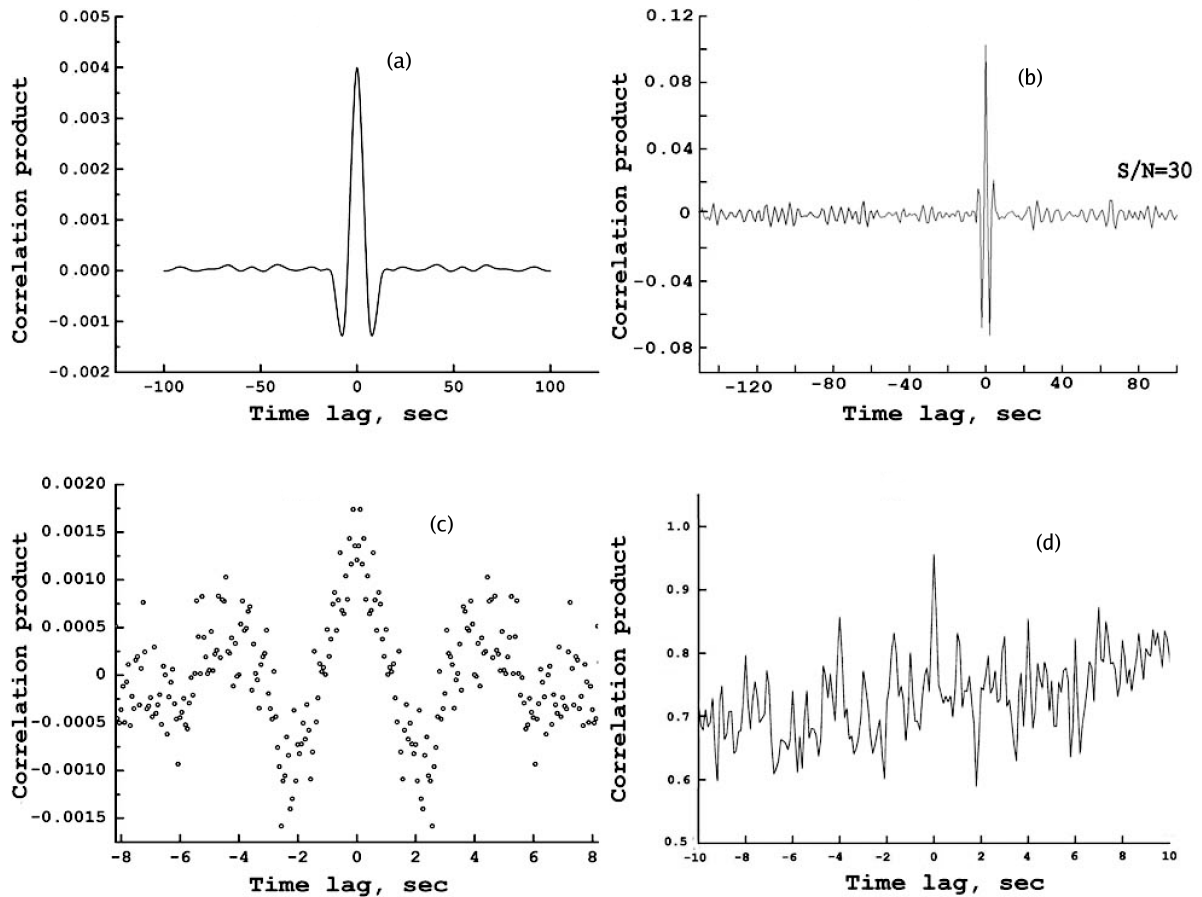


Рис. 11. (а) — корреляционная функция регистрируемого сигнала на центральном сечении RZF-обзора на длине волны 7.6 см для двух независимых массивов наблюдений по 200 суток каждый после удаления всех деталей более трех (что близко к порогу NVSS-каталога для радиисточников с нормальными спектрами на длине волны 7.6 см) и фильтрации MHW, оставляя только масштабы порядка диаграммы РАТАН-600. Форма кривой точно соответствует ожидаемой для шума от точечных радиисточников после MHW-фильтрации в полосе RZF-обзора; (b) — то же на длине волны 3.9 см. Видно, что в остаточном шуме доминирует шум от слабых точечных радиисточников. (c) и (d) — то же на длинах волн 2.7 см и 1.38 см.

излучения, что позволяет экстраполировать синхротронный фон до частот эксперимента Planck с чувствительностью выше 1 мК.

Дипольный шум заряженных пылинок (фуллеренов). Получено, что дипольное излучение макромолекул имеет малое влияние на исследования поляризованного мелкомасштабного фона Вселенной [7].

Уточнен верхний предел на анизотропию радиоизлучения ионизированного газа Галактики на масштабах, интересных для экспериментов по реликтовому фону, что позволяет также оценить роль фарадеевского шума для поляризации синхротронного излучения Галактики.

Фоновое излучение точечных источников. Ожидаемый процент NVSS-объектов, опасных для миллиметрового диапазона длин волн, мал и для достаточно больших l их число существенно

меньше числа элементов разрешения порядка $4\pi l$. Простое выделение известных по каталогу NVSS опасных мест позволит практически без потерь получить данные о спектре мощности реликтового фона в пространстве Cl . Подозрение о существовании ощутимой популяции радиисточников, опасных для экспериментов ближайших лет, оказались преувеличенными, по крайней мере, на уровне чувствительности экспериментов WMAP и Planck. Обнаруженный в RZF-обзоре шум от неопознанных радиисточников на уровне долей мЯн в сантиметровом диапазоне длин волн не является опасным для ведущихся сегодня экспериментов по реликтовому излучению, так как он соответствует долям мК для эксперимента Planck.

Дальнейшее продвижение по устранению шума от радиисточников любой природы можно реализовать, комбинируя обзоры неба с высоким (избыточным для реликтового фона) угловым раз-

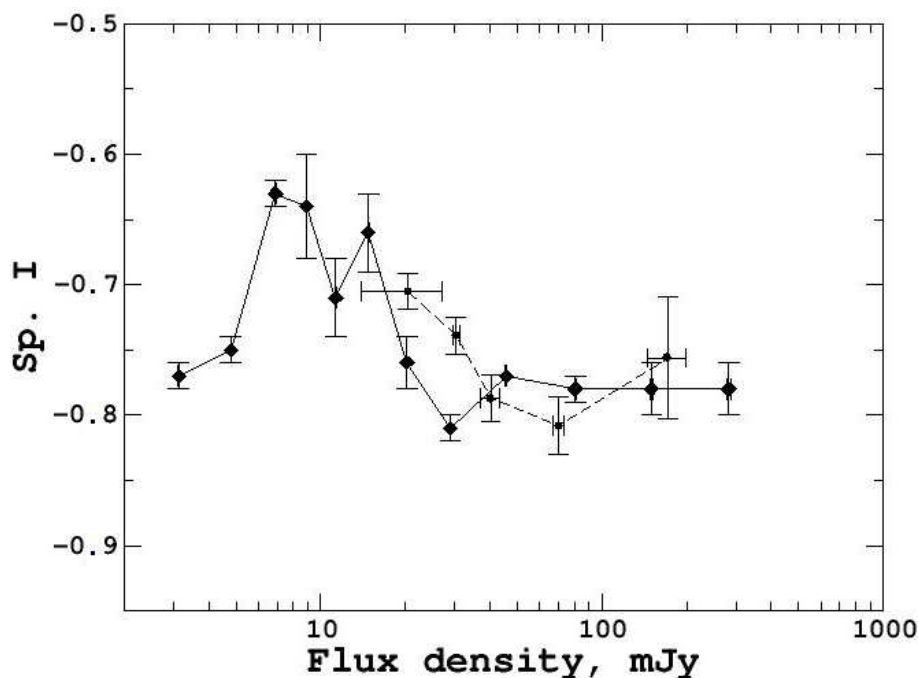


Рис. 12. RZF-данные на длине волны 7.6 см для NVSS-объектов разного уровня плотностей потоков на 21 см. Объекты сильнее 30 мЯн исследованы индивидуально (прерывистая кривая), слабее — статистически методом “фамильного портрета” (сплошная кривая).

решением по точечным радиоисточникам с экспериментами по фоновым излучениям типа Планк. Проект “Генетический код Вселенной” относится к этой категории, где эта комбинация реализуется на одном и том же радиотелескопе. Фоновые излучения на масштабах диаграммы одного элемента поверхности регистрируются без каких-либо потерь (в отличие от интерферометрических сетей), а точечные радиоисточники выделяются на масштабах порядка λ/D с чувствительностью в порядка 1000 раз более высокой, чем в эксперименте Планк.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы статьи выражают благодарность лаборатории радиометров континуума и группе АСУ РАТАН-600 за обеспечение длительных наблюдений на РАТАН-600 с высокой чувствительностью. Работа выполнена при поддержке гранта Российского Фонда Фундаментальных Исследований (11-02-12036-офи-м-2011, 11-02-00489-а) и ОФН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <http://www.spbf.sao.ru/CG/>
2. Ю. Н. Парийский, Атомная стратегия **8**, 19 (2005).
3. M. Tegmark, D. J. Eisenstein, Wayne Hu, et al., *Astrophys. J.* **530**, 133 (2000).
4. Н. Н. Бурсов, Ю. Н. Парийский, Е. К. Майорова, и др., *Астрон. ж.* **84**, 227 (2007).
5. Н. Н. Бурсов, Кандидатская диссертация по математике и физике, (САО РАН, Нижний Архыз, 2003).
6. Т. А. Семенова, Н. Н. Бурсов и Ю. Н. Парийский, *Астрон. ж.* **84**, 291 (2007).
7. Т. А. Семенова, Ю. Н. Парийский и Н. Н. Бурсов, *Астрон. ж.* **86**, 3 (2007).
8. T. A. Semenova, Yu. N. Parijskij, and P. G. Tsybulev, *Astrophysical Bulletin* **64**, 191 (2009).
9. T. A. Semenova, N. N. Bursov, and Yu. N. Parijskij, *Astrophysical Bulletin* **64**, 270 (2009).
10. Т. А. Семенова, Кандидатская диссертация по математике и физике (САО РАН, Нижний Архыз, 2009).
11. P. G. Tsybulev, A. V. Berlin, N. A. Nizhel'skij, et al., *Astrophysical Bulletin* **62**, 193 (2007).
12. O. V. Verkhodanov, *ASPC* **125**, 46 (1997).
13. П. Д. Насельский, Д. И. Новиков и И. Д. Новиков, *Реликтовое излучение Вселенной* (Наука, Москва, 2003).
14. О. В. Верхованов и Ю. Н. Парийский, *Реликтовое излучение Вселенной* (ФИЗМАТЛИТ, Москва, 2009).
15. Н. Е. Jorgensen, E. V. Kotok, I. P. Naselsky, et al., e-Print: arXiv: astro-ph/9910295v1.
16. C. G. T. Haslam, U. Klein, C. J. Salter, et al., *Astronom. and Astrophys.* **100**, 209 (1981).
17. C. G. T. Haslam, C. J. Salter, H. Stoffel, and W. E. Wilson, *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **47**, 1 (1982).

18. R. D. Ekers, M. Massardi, and E. M. Sadler, Pos(MRU)047, <http://pos.sisa.it/cgi-bin/reader/conf.cgi?confid=52>.
19. P. Vielva, et al., Monthly Notices Roy. Astronom. Soc. **344**, 89 (2003).
20. <http://www.rssd.esa.int/index.php?project=planck>, “Bluebook”.
21. Ю. Н. Парийский и Д. В. Корольков, *Астрофизика и космическая физика*, Итоги науки и техники Сер. Астрономия **31** (ВИНИТИ, Москва, 1986).
22. А. И. Копылов, В. М. Госс, Ю. Н. Парийский и др., Письма в АЖ **32**, 483 (2006).
23. М. Г. Мингалиев, Ю. В. Сотникова, Н. Н. Бурсов и др., Астрон. ж. **84**, 387 (2007).
24. N. S. Soboleva, E. K. Majorova, O. P. Zhelenkova, et al., Astrophysical Bulletin **65**, 42 (2010).
25. <http://www.astrostack.com>

MULTI-FREQUENCY SURVEY OF BACKGROUND RADIATIONS OF THE UNIVERSE. THE “COSMOLOGICAL GENE” PROJECT. FIRST RESULTS

Yu.N. Parijskij, M.G. Mingaliev, N.A. Nizhel'skii, N.N. Bursov, A.B. Berlin, A.A. Grechkin, V.I. Zharov, G.V. Zhekanis, E.K. Majorova, T.A. Semenova, V.A. Stolyarov, P.G. Tsybulev, D.V. Kratov, R.Yu. Udovitskii, V.B. Khaikin

The results of the first stage of the “Cosmological Gene” project of the Russian Academy of Sciences are reported. These results consist in the accumulation of multi-frequency data in 31 frequency channels in the wavelength interval 1–55 cm with maximum achievable statistical sensitivity limited by the noise of background radio sources at all wavelengths exceeding 1.38 cm. The survey region is determined by constraints $00^h < RA < 24^h$ and $40^{\circ}30' < DEC < 42^{\circ}30'$. The scientific goals of the project are refined in view of recent proposals to use cosmological background radiation data for the development of a unified physical theory. Experimental data obtained with the RATAN-600 radio telescope are used to refine the contribution of the main “screens” located between the observer and the formation epoch of cosmic background radiation ($z = 1100$). Experimental data for synchrotron radiation and free-free noise on scales that are of interest for the anisotropy of cosmic microwave background are reported as well as the contribution of these noise components in millimeter-wave experiments to be performed in the nearest years. The role of dipole radio emission of fullerene-type dust nanostructures is shown to be small. The most precise estimates of the role of background radio sources with inverted spectra are given and these sources are shown to create no serious interference in experiments. The average spectral indices of the weakest sources of the NVSS and FIRST catalogs are estimated. The “saturation” data for all wavelengths allowed a constraint to be imposed on the Sunyaev-Zeldovich noise (the SZ noise) at all wavelengths, and made it possible to obtain independent estimates of the average sky temperature from sources, substantially weaker than those listed in the NVSS catalog. These estimates are inconsistent with the existence of powerful extragalactic synchrotron background associated with radio sources. Appreciable “quadrupole” anisotropy is detected in the distribution of the spectral index of the synchrotron radiation of the Galaxy, and this anisotropy should be taken into account when estimating the polarization of the cosmic microwave background on small l . All the results are compared to the results obtained by foreign researchers in recent years.

Key words: *cosmology: cosmic background radiation*