

УДК 524.6-77:520.27

НАБЛЮДЕНИЯ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ ФЛУКТУАЦИЙ ГАЛАКТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА РАДИОТЕЛЕСКОПЕ РАТАН-600

© 2012 В.А. Столяров^{1,2}, Ю.Н. Парийский¹, Н.Н. Бурсов¹,
М.Г. Мингалиев¹, Т.А. Семенова¹, П.Г. Цыбулёв¹

¹Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 369167 Россия

²Кавендишевская Лаборатория, Кембриджский Университет, Кембридж, СВЗ ОНЕ, Великобритания

Поступила в редакцию 14 ноября 2011 г.; принята в печать 10 декабря 2011 г.

В статье приводятся оценки мощности свободно-свободного и синхротронного излучения Галактики на средних и мелких масштабах ($500 < l < 1000$, $20' < \theta < 40'$) по результатам наблюдений на радиотелескопе РАТАН-600 (САО РАН). Наблюдения проводились в диапазоне от 2.3 до 11.2 ГГц в полосе склонений $40.7^\circ < \delta < 42.3^\circ$. Получены оценки спектра мощности свободно-свободной и синхротронной компонент, которые можно будет в дальнейшем использовать при обработке данных космологических экспериментов высокого разрешения, таких как Planck.

Ключевые слова: Галактика: реликтовое излучение—Галактика: диффузное излучение

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время проводится несколько экспериментов высокого разрешения для наблюдения анизотропии реликтового излучения (РИ), основным из которых является спутниковый эксперимент Planck [1, 2], который был запущен в мае 2009 года.

При обработке данных таких экспериментов важным этапом является разделение компонент, во время которого сигнал РИ отфильтровывается от шумов и излучения других астрофизических процессов, таких как синхротронное и свободно-свободное излучение Галактики, излучение галактической пыли, а также излучение внегалактического происхождения — радиоисточники, эффект Сюняева-Зельдовича и т.д. [3]. Разработано большое количество методов разделения компонент излучения, подразделяющихся на две группы. Первая группа это т.н. “слепые” методики, которые не используют никакой априорной информации о предполагаемых компонентах. К ним относятся SMICA [4], ICA/FastICA [5], методики с расчетом функции правдоподобия (Commander, [6]) и некоторые другие. Вторая группа методов использует всю доступную информацию о компонентах: количество различных компонент излучения, их корреляционные свойства (обычно спектры и кросс-спектры мощности) и частотные зависимости. К этой второй группе относятся Component Correlation Analysis (ССА, [7]) и метод максимума

энтропии (MEM, [8]). Обзор различных методов разделения компонент приведен в работе [9].

“Слепые” методики уверенно определяют вклад РИ на крупных и средних масштабах, но на мелких масштабах испытывают трудности, так как сигнал РИ становится слабым в области силковского затухания ($l > 2000$), а мощность других компонент уменьшается не так сильно. Вторая группа методик позволяет разделять РИ и другие компоненты по широкому диапазону масштабов, но эти методы достаточно чувствительны к априорной информации, такой как уровень шумов, профили диаграмм направленности на различных частотах, спектральные свойства компонент и их пространственные спектры мощности.

Информация о шумах аппаратуры и диаграммах направленности обычно бывает известна еще до начала эксперимента и уточняется в процессе наблюдений. Со свойствами самих компонент ситуация обстоит сложнее. Если свойства самого РИ достаточно хорошо изучены (см., например, [10]), и можно уверенно утверждать, что РИ обладает планковским спектром в широком диапазоне частот, а его спектр мощности можно получить как непосредственно из измерений на больших и средних масштабах [11, 12], так и смоделировать на мелких масштабах (например, с помощью утилиты CMBfast, алгоритм описан в [13] и в последующих публикациях), то информация о галактических компонентах излучения ограничена наблюдениями в разных частотных диапазонах на различных

инструментах, и обычно с довольно небольшой чувствительностью и разрешением.

Так, для галактического синхротрона основным источником информации являются обзоры на частоте 408 МГц [14], на 1420 МГц [15], а также на 2300 МГц [16]. Полученные в последнее время оценки вклада галактического синхротрона для масштабов $l < 100$ в эксперименте WMAP [17] также основаны на этих работах. Заметим, что максимальное разрешение в этих экспериментах составляет примерно 20 угловых минут. Модельная карта синхротронного излучения для всей небесной сферы по наблюдениям в диапазоне 408–2300 МГц приведена в работе [18]. Мелкие масштабы там смоделированы и имеют Гауссово распределение.

В случае свободно-свободного излучения галактики провести прямые измерения очень сложно, так как эта компонента излучения слабее синхротрона, но имеет близкий к нему спектральный индекс. Существующие оценки вклада свободно-свободного излучения основаны на наблюдениях в линии H_{α} . Такие наблюдения при различном покрытии небесной сферы проводились в экспериментах WHAM ($\delta > -30^\circ$, разрешение порядка 1 градуса) [19], SHASSA ($\delta < 15^\circ$, разрешение порядка 1 угловой минуты) [20], а также в некоторых других. В статье [21] по данным этих экспериментов сконструирована карта свободно-свободного излучения для всего неба.

Для пылевой компоненты основным источником информации является эксперимент IRAS, по результатам которого построены карты теплового излучения пыли на длине волны $100\mu\text{m}$ [22]. В данном случае разрешение составляло около 5 угловых минут.

В последние несколько лет появились свидетельства существования еще одной компоненты галактического излучения — аномальной (предположительно вращательной) пыли. Источником излучения в миллиметровом диапазоне в данном случае являются вращающиеся заряженные пылевые частички, имеющие электрический дипольный момент, как подробно рассмотрено в работе [23] и в последующих статьях. Максимум излучения вращательной пыли должен приходиться на диапазон 20–40 ГГц, что подтверждается наблюдениями объектов не только в нашей Галактике, но и в других галактиках [24–27].

Хотя предпринимались попытки восстановить компоненту излучения вращательной пыли по наблюдениям WMAP [28–30], оценки производились только для крупных масштабов. Также в литературе отсутствует достоверная информация о вкладе синхротронного и свободно-свободного

излучения на мелких масштабах ($l > 1000$). В настоящей работе приводятся оценки галактического синхротрона и свободно-свободной компоненты излучения по наблюдениям на радиотелескопе РАТАН-600 [31] на масштабах $1000 < l < 2000$. Эти результаты впоследствии могут быть использованы для разделения компонент и восстановления сигнала РИ в других космологических экспериментах, а также при наблюдениях РИ на мелких масштабах на самом радиотелескопе РАТАН-600 при использовании новых приемников на более высоких частотах.

2. НАБЛЮДЕНИЯ

Наблюдения на РАТАН-600 проводились по программе “Зенит” в режиме обзоров — прохождение через неподвижную диаграмму радиотелескопа участков неба с почасовой перестановкой Северного сектора антенны. Данные получены на высокочувствительном приемно-измерительном комплексе радиометров сплошного спектра — Облучателе N1. Комплекс обладает высокой чувствительностью по яркостной температуре неба, что дает возможность исследовать фоновые составляющие излучения. Основные частоты наблюдений РАТАН-600: 0.6, 1.0, 2.3, 3.9, 4.8, 7.7, 11.2, 21.7 и 30 ГГц, что соответствует длинам волн: 49, 30, 13, 7.6, 6.25, 3.9, 2.7, 1.38 и 1 см. Радиометры на 1.0 см представляют собой 3 однотипных неохлаждаемых модуля с широкой полосой пропускания “МАРС2”, охлаждаемые радиометры на 1.38, 2.7 и 3.9 см работали в однолучевом режиме наблюдений “рупор в небо”. Был также задействован новый охлаждаемый радиометр для измерения круговой поляризации на длину волны 6.25 см и три дециметровых неохлаждаемых радиометра на длину волны 13, 30 и 49 см. Все радиометры дециметрового диапазона работали в режиме частотно-временного помехоподавления, как описано в работе [32]. На первом этапе проведения обзоров был также использован лучший по флуктуационной чувствительности радиометр на длину волны 7.6 см на основе параметрического усилителя. Все радиометры имеют входные усилители на НЕМТ-транзисторах.

В настоящее время массив накопленных данных составляет около года непрерывных наблюдений [33]. Наиболее длительное накопление получено в центральной полосе обзоров ($\text{Dec}_{\text{C84}} = 41.5^\circ$), где на каждый час прямого восхождения приходится 300–400 записей. Это позволило достигнуть чувствительности, близкой к максимально возможной для радиотелескопа РАТАН-600 — менее одного миллианского по плотности потока в сантиметровой области спектра. На длинах волн 6.25 и 7.6 см был достигнут

предел, определяемый слабыми фоновыми радиосточниками [34].

Область неба для глубоких обзоров была выбрана вблизи местного зенита, т.к. на таких больших высотах антенна RATAN-600 имеет большую безаберационную зону. Размеры области наблюдений, получившей название RZF-обзор (RATAN Zenith Field), были выбраны следующие: $0^h < \text{R.A.} < 24^h$, $\text{Dec} = 41.5^\circ \pm 1.0^\circ$.

Наблюдения области неба проводились 2–4 месячными циклами ежегодно в период времени 2001–2008 гг. Обзоры проводились в режиме сечений неба через 0.1 градуса по склонению — 17 сечений для всей ширины полосы. Длительность накоплений на каждом сечении составила от 40 и более дней наблюдений (транзитных сканов).

3. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

3.1. Предварительная обработка

Накопление больших массивов данных в многосуточных обзорах неба позволяет провести разделение шумов Галактики и Метагалактики, повторяющихся ото дня ко дню, от случайных шумов радиометра, атмосферы и различных помех [35]. Для этого выполняется простейшая процедура — разбиение данных на две близкие по качеству группы наблюдений и определение дисперсий для полусумм ($\sigma_{(I+II)/2}$) и для полуразности ($\sigma_{(I-II)/2}$) данных в этих группах. Тогда дисперсия повторяющейся ото дня ко дню составляющей σ будет равна $\sigma^2 = \sigma_{(I+II)/2}^2 - \sigma_{(I-II)/2}^2$.

Чем больше число независимых отсчетов в массиве данных и чем больше число суточных наблюдений, тем точнее статистические оценки искомого сигнала. Погрешность определения дисперсии будет близка к $\sigma(\tau = 1)/(T)^{1/2}$, где $\sigma(\tau = 1 \text{ сек})$ — чувствительность радиотелескопа при времени накопления равном 1 секунде, а T — полное время эксперимента. Для уже накопленных данных с чувствительностью $\sigma = 2\text{--}6 \text{ мК/сек}^{1/2}$ и $T = 4\text{--}6 \times 10^6 \text{ сек}$, точность оценки дисперсии близка к 20 мК . При отсутствии случайных шумов эта точность относится к дисперсии исследуемого шумового сигнала. Если доминирует случайный шум, погрешность будет существенно больше. Простое моделирование дает

$$\sigma = (\sigma_{(I+II)/2} \times \sigma(\tau = 1)/(T)^{1/2})^{1/2}.$$

Массив данных, полученных из наблюдений, состоит из выборок отдельных файлов часовой длительности на частотах 2.3, 4.8, 7.7, 11.2, 21.7 и 30 ГГц. Методика обработки была подобрана отдельно для каждой выборки файлов, с учетом особенностей и режима наблюдений на данной

частоте. В данной работе приведены результаты обработки только части полосы RZF-обзора с 0 по 4 час включительно по прямому восхождению. Это сделано в предположении близких оценок фоновых составляющих в остальной полосе наблюдений.

Алгоритм обработки включал:

- формирование однородных выборок файлов по всем частотам наблюдения (коррекция параметров, отбраковка сбойных файлов, оптимизация по времени);
- калибровка записей по амплитуде, коррекция по времени методом кросс-корреляции между смоделированными записями по источникам NVSS-каталога [36] и соответствующими записями наблюдений;
- пиксельное накопление данных методом векового осреднения;
- фильтрация долговременных искажений, связанных с излучением земли и атмосферы;
- вычитание дискретных источников методом гаусс-анализа;
- нахождение полусумм и полуразностей из выборок обработанных файлов.

Фильтрация атмосферных уходов с большими временными масштабами осуществлялась путём проведения фона (background) с постоянной времени $t_b = 150 \text{ сек}$ по одномерным записям сканов с последующим его вычитанием. На склонении $\text{Dec} = 41^\circ$ такой временной интервал соответствует угловому масштабу $\theta \approx 28'$, или $l \approx 750$. Моделирование процесса проведения фона в области сферических гармоник показало, что это фильтр высоких частот (ФВЧ) на частоту среза, соответствующую масштабу $l = 500$, где мощность сигнала падает вдвое. Пример оценки передаточной функции этого фильтра $B_{BG} = C_i^f/C_i$ приведен на Рис. 1. На больших масштабах при $l < 200$ наблюдается некоторый подъём передаточной функции из-за т.н. страйпинга, за счёт которого возникает $1/f$ — компонента шума. Это явление связано не с шумом приёмников, а с методикой конструирования площадки из отдельных сканов. В любом случае, к оценкам мощности на масштабах $l < 500$ нужно относиться с осторожностью.

После проведения предварительной обработки, оценок уровня систематики и шумов в полученных записях, было принято решение оставить для последующей работы по разделению компонент только 4 канала с рабочими частотами 2.3, 4.8, 7.7

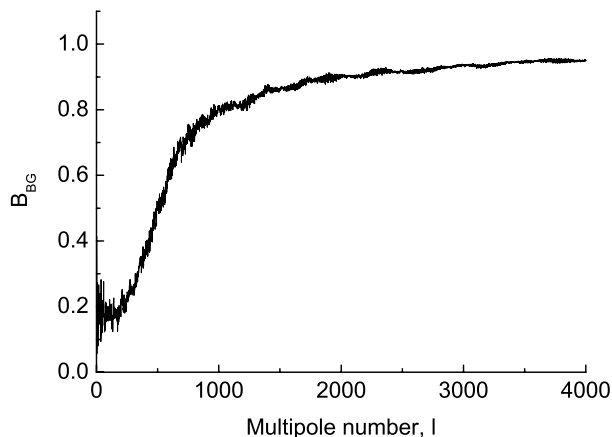


Рис. 1. Пример оценки передаточной функции фильтра B_{BG} , использующего проведение фона с временным окном $t_b = 150$ сек в сигнальной области.

и 11.2 ГГц, что вполне достаточно для восстановления основных компонент, дающих вклад на низких частотах — синхротрона, свободно-свободного излучения (*bremsstrahlung*) и, возможно, вращательной пыли. Уверенная регистрация РИ при таком частотном покрытии не ожидалась.

В Табл. 1 приведено время накопления и реализованная пиксельная чувствительность [37] для используемых частот наблюдений RZF-обзора.

При последующей обработке записей сканов формировались полосы с размером пиксела 6×6 угл. минут, что соответствует расстоянию между соседними сканами. Для этого проводилась компрессия сканов путём усреднения соседних отсчётов с коэффициентом компрессии $K_{\text{comp}} = 320$.

Таблица 1. Чувствительность RZF-обзора на используемых частотах

Частота (длина волны), ГГц (см)	Среднее число наблюдений, сут.	Чувствительность, мК \times сек $^{-1/2}$
11.2 (2.7)	45	3
7.7 (3.9)	45	3
4.85 (6.25)	60	2.2
2.3 (13)	225	8

Полученные полосы размером 553×16 пикселей, соответствующие участку небесной сферы с координатами $0^h < \text{R.A.} < 5^h$ и $40^\circ.7 < \text{Dec} < 42^\circ.3$, приведены на Рис 2. Спектры мощности для полусуммы и полуразности приведены на Рис 3.

3.2. Разделение компонент

Разделение галактических компонент излучения производилось методом максимума энтропии (МЕМ) в гармонической области [8, 38]. Вкратце напомним основные моменты этого метода. При многочастотных наблюдениях на n_f частотах для каждого направления на небесной сфере \hat{x} можно сформировать вектор данных, который содержит n_f наблюдаемых значений температуры (или интенсивности):

$$d_\nu(\hat{x}) = \int_{4\pi} B_\nu(\hat{x} \times \hat{x}') \sum_{p=1}^{n_c} F_{\nu p} s_p(\hat{x}') d\Omega' + \epsilon_\nu(\hat{x}), \quad (1)$$

где n_c — количество компонент излучения (РИ, излучения Галактики и др.), $F_{\nu p}$ — матрица отклика на данных частотах для всех компонент, B_ν — профиль диаграммы направленности на частоте ν , $\epsilon_\nu(\hat{x})$ — вклад шумовой компоненты на частоте ν , и $s_p(\hat{x})$ — сигнал от p -ой компоненты излучения в данном направлении на небесной сфере. Интегрирование производится по телесному углу Ω .

При наблюдении с диаграммами направленности одинаковой ориентации по наблюдаемой площадке можно перейти в Фурье-область и избавиться от свёртки с профилем диаграммы, которая

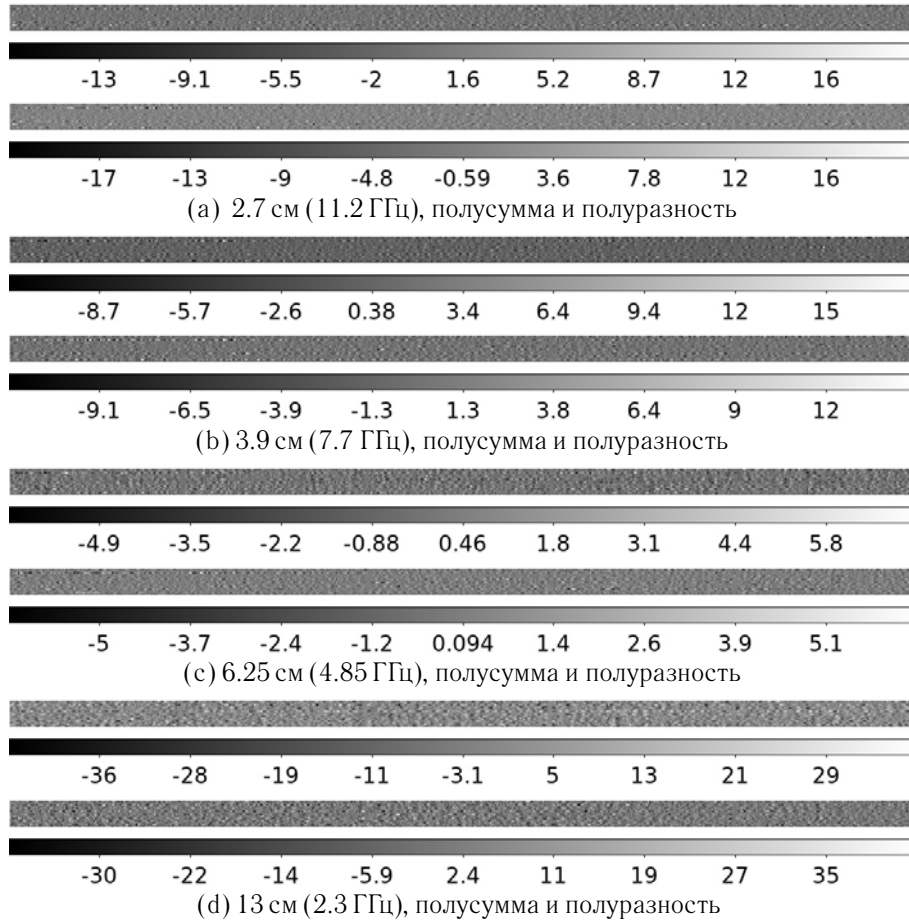


Рис. 2. Полоски размером 553×16 пикселей, сконструированные из записей транзитных сканов РАТАН-600 после вычитания фона и компрессии, соответствующие участку с координатами $0^h < \text{R.A.} < 5^h$ и $40^\circ 7' < \text{Dec} < 42^\circ 3'$. Верхние полоски соответствуют полусумме, нижние — полуразности. Данные приведены для следующих частот: а) 11.2 ГГц, б) 7.7 ГГц, в) 4.85 ГГц, г) 2.3 ГГц, единицы измерения — миллиградусы антенной температуры (mK).

в этом случае заменяется произведением, а для каждой Фурье-моды (i, j) будет справедливо следующее выражение:

$$\mathbf{d}_{ij} = \mathbf{R}_{ij}\mathbf{a}_{ij} + \epsilon_{ij}, \quad (2)$$

где вектора данных \mathbf{d}_{ij} , сигнала \mathbf{a}_{ij} и шума ϵ_{ij} состоят, соответственно, из n_f , n_c и n_f комплексных элементов. Матрица частотного отклика \mathbf{R}_{ij} имеет размер $n_f \times n_c$ и отражает эффект свёртки с диаграммой и частотные зависимости компонент. Дальнейшие выкладки будут производиться для случая одной фурье-моды, а индексы (i, j) будут опущены.

Согласно теореме Байеса, апостериорная вероятность получения сигнала определенной амплитуды от астрофизических компонент при наличии

наблюдаемых данных и известных свойств шума определяется следующим выражением:

$$\Pr(\mathbf{a}|\mathbf{d}) = \frac{\Pr(\mathbf{d}|\mathbf{a}) \Pr(\mathbf{a})}{\Pr(\mathbf{d})}, \quad (3)$$

где $\Pr(\mathbf{a}|\mathbf{d})$ — апостериорная вероятность того, что сигнал от компонент излучения \mathbf{a} имеет данную амплитуду при наличии наблюдаемых данных \mathbf{d} , $\Pr(\mathbf{a})$ — априорная вероятность иметь сигнал от набора компонент \mathbf{a} , $\Pr(\mathbf{d})$ является по существу нормировкой, а $\Pr(\mathbf{d}|\mathbf{a})$ — функция правдоподобия, в данном случае выражающаяся через статистику χ^2 :

$$\chi^2(\mathbf{a}) = (\mathbf{d} - \mathbf{R}\mathbf{a})^\dagger \mathbf{N}^{-1}(\mathbf{d} - \mathbf{R}\mathbf{a}) \quad (4)$$

$$\Pr(\mathbf{d}|\mathbf{a}) \propto \exp(-\chi^2(\mathbf{a})). \quad (5)$$

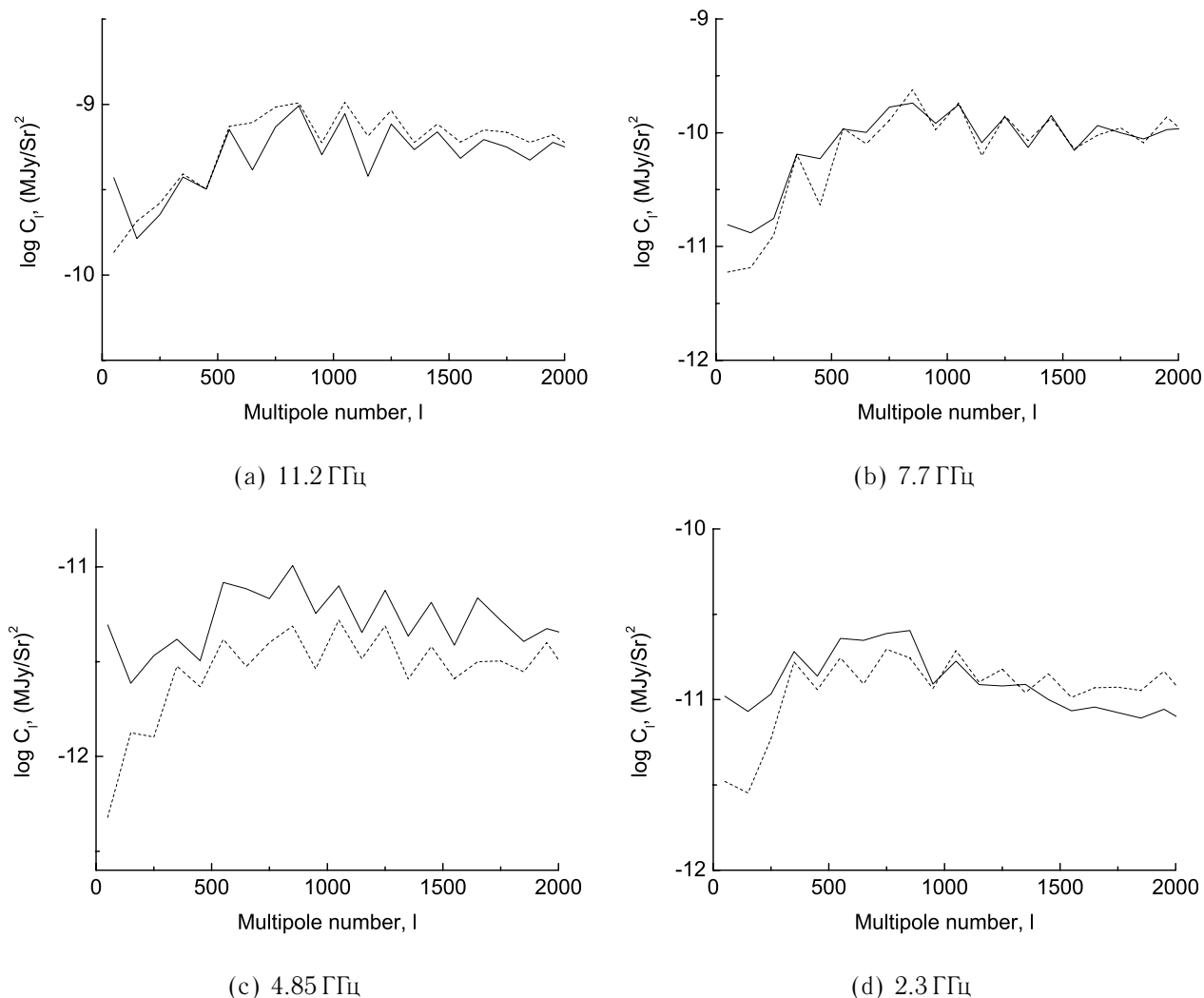


Рис. 3. Спектры мощности площадок, сконструированных из записей полусумм (сплошная линия) и полуразностей (прерывистая линия). Предполагается, что полуразностные записи содержат преимущественно шум приёмников. Данные приведены для следующих частот: а) 11.2 ГГц, б) 7.7 ГГц, в) 4.85 ГГц, г) 2.3 ГГц, единицы измерения — квадрат интенсивности $(\text{MJy/Sr})^2$.

Здесь \mathbf{N} представляет собой корреляционную матрицу шума размером $n_f \times n_f$ для отдельной Фурье-моды (i, j) .

Для того, чтобы определить наиболее вероятную амплитуду сигнала \mathbf{a} , необходимо найти максимум $\text{Pr}(\mathbf{a}|\mathbf{d})$, что можно сделать численно методами оптимизации. Однако решение этой задачи в полном объёме обычно требует больших вычислительных ресурсов. В предположении того, что соседние Фурье-моды независимы друг от друга, эту проблему можно разбить на множество подзадач и проводить численную оптимизацию для каждой моды (i, j) независимо.

Если при известных свойствах шума функция правдоподобия определяется однозначно через статистику χ^2 , то для формы априорной вероятности $\text{Pr}(\mathbf{a})$ существует некоторая свобода выбора. Если компоненты имеют структуру на небесной сфере, близкую к Гауссовой, то форма $\text{Pr}(\mathbf{a})$ тоже может быть Гауссовой. В этом случае можно сконструировать Винеровский фильтр и получить аналитическое решение для \mathbf{a} [38]. Однако распределение синхротронного, пылевого и свободно-свободного излучения далеко от Гауссового, хотя бы из-за наличия яркой плоскости Галактики. В этом случае было показано [38], что наиболее под-

ходящей является энтропийная форма априорной вероятности, но в этом случае решение ищется не для амплитуды сигнала \mathbf{a} , а для её некоррелированной компоненты \mathbf{h} :

$$\Pr(\mathbf{h}) \propto \exp(\alpha S(\mathbf{h}, \mathbf{m})), \quad (6)$$

где $S(\mathbf{h}, \mathbf{m})$ — *кросс-энтропия* между некоррелированной компонентой сигнала \mathbf{h} и некоторой моделью \mathbf{m} [38]. Следует отметить, что вектор \mathbf{h} , как правило, комплексный, и значения реальной и мнимой частей компонент могут быть отрицательными. Выражение для энтропии в случае таких распределений выведено в статье [39]. Полное значение амплитуды сигнала \mathbf{a} получается перемножением некоррелированной компоненты сигнала \mathbf{h} с некоторой матрицей \mathbf{L} , получаемой путём разложения Холецкого из корреляционной матрицы сигнала \mathbf{C} :

$$\mathbf{a} = \mathbf{L}\mathbf{h} \quad (7)$$

$$\langle \mathbf{a}\mathbf{a}^\dagger \rangle = \langle \mathbf{L}\mathbf{h}\mathbf{h}^\dagger\mathbf{L}^\dagger \rangle = \mathbf{L}\langle \mathbf{h}\mathbf{h}^\dagger \rangle\mathbf{L}^\dagger = \mathbf{L}\mathbf{L}^\dagger = \mathbf{C}. \quad (8)$$

Таким образом, при использовании энтропийной формы априорной вероятности, выражение 3 можно переписать следующим образом:

$$\Pr(\mathbf{a}|\mathbf{d}) \propto \exp(-\chi^2(\mathbf{h}) + \alpha S(\mathbf{h}, \mathbf{m})). \quad (9)$$

Для получения оценки сигнала $\hat{\mathbf{a}}$ в нашем случае сначала нужно получить оценку его некоррелированной компоненты $\hat{\mathbf{h}}$ путём минимизации функционала

$$\Phi_{\text{МЕМ}} = \chi^2(\mathbf{h}) - \alpha S(\mathbf{h}, \mathbf{m}), \quad (10)$$

а затем восстановить значение $\hat{\mathbf{a}} = \mathbf{L}\hat{\mathbf{h}}$. Далее можно оценить спектр мощности восстановленного сигнала:

$$\hat{\mathbf{C}}^{\text{rec}} = \langle \hat{\mathbf{a}}\hat{\mathbf{a}}^\dagger \rangle. \quad (11)$$

Ошибки восстановления вектора $\hat{\mathbf{a}}$ можно получить в предположении Гауссова распределения апостериорной вероятности в области максимума, соответствующего значению $\hat{\mathbf{h}}$ [38]. Используя гессиан функционала из (10), $\mathbf{H}_{\text{МЕМ}} = \nabla_{\mathbf{h}}\nabla_{\mathbf{h}}^*\Phi_{\text{МЕМ}}$, можно показать, что ковариационная матрица ошибок $\hat{\mathbf{h}}$ приближённо определяется обратной гессиановской матрицей,

$$\langle (\mathbf{h} - \hat{\mathbf{h}})(\mathbf{h} - \hat{\mathbf{h}})^\dagger \rangle = \mathbf{H}_{\text{МЕМ}}^{-1}, \quad (12)$$

а ошибки $\hat{\mathbf{a}}$ будут определяться следующим выражением:

$$\langle (\mathbf{a} - \hat{\mathbf{a}})(\mathbf{a} - \hat{\mathbf{a}})^\dagger \rangle = \mathbf{L}\mathbf{H}_{\text{МЕМ}}^{-1}\mathbf{L}^\dagger. \quad (13)$$

Следует отметить, что определение ошибок в данном случае проводится в гармонической области. В пиксельной области ошибки восстановления

компонент можно получить либо интегрированием результата (13) по всем модам для каждого пиксела, либо методом Монте-Карло, генерируя реализации шума в гармонической области с последующим восстановлением карты шума в пиксельной области, её осреднением и вычислением дисперсии.

Разумеется, данная методика не предназначена для *независимой* оценки спектра мощности восстановленного сигнала \mathbf{a} , поскольку для запуска алгоритма оптимизации нужна информация о ковариационной матрице сигнала \mathbf{C} . Однако используя имеющуюся априорную информацию о статистических свойствах компонент, можно эти свойства уточнить, выполняя одну или несколько итераций алгоритма.

Реконструированная таким образом карта неба будет подвержена сглаживанию некоторой функцией, т.н. оконной функцией восстановления. Она аналогична действию некоторой диаграммы инструмента, но с существенно негауссовым профилем. Естественно, спектр мощности, рассчитанный по реконструированной карте, также будет сглажен. Применяя подход, описанный в работе [8], можно получить несмещённую оценку спектра мощности, используя следующее соотношение:

$$B_l = 1.0 - \frac{C_l^{\text{err}}}{C_l^p} \quad (14)$$

$$\hat{C}_l^{\text{unb}} = \hat{C}_l^{\text{rec}} / B_l, \quad (15)$$

где B_l — оконная функция восстановления, \hat{C}_l^{unb} — несмещённая оценка спектра мощности, \hat{C}_l^{rec} — спектр мощности, рассчитанный по восстановленной карте (11), C_l^{err} — спектр мощности ошибок, определяемый (13), а C_l^p — априорный спектр мощности компоненты, используемый в (8). Используя (12–14) можно показать, что при очень низком отношении сигнал–шум несмещённая оценка спектра мощности полностью определяется априорным спектром мощности компоненты.

4. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

4.1. Разделение компонент по модельным данным

Для отработки методики разделения компонент излучения применительно к нашему случаю использовались модели излучения РИ и других компонент на частоте 30 ГГц. Из этих моделей, при необходимости предварительно экстраполированных на рабочие частоты РАТАН-600, конструировались карты неба, которые, будучи свёрнутыми с соответствующими диаграммами и после добавления шума, эквивалентного шуму приёмников, формировали входной массив данных для программы разделения компонент. Хотя излучение РИ на столь низких частотах очень слабо, оно

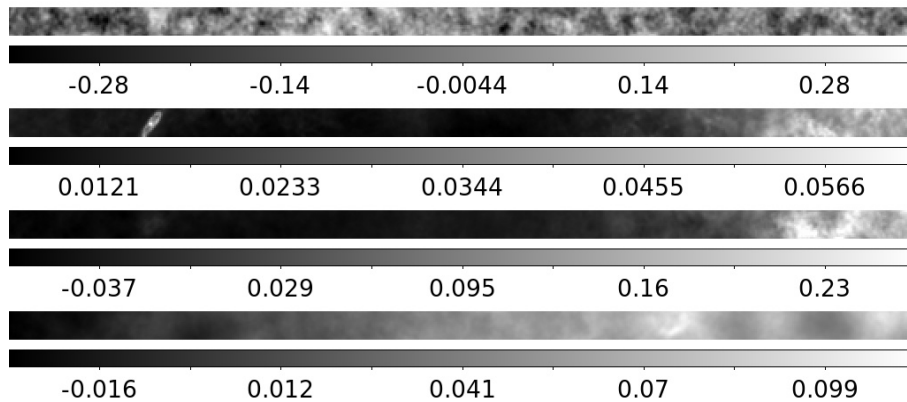


Рис. 4. Модельные карты компонент излучения на опорной частоте 30 ГГц, соответствующие области наблюдения зенитного обзора, ширина полоски по склонению $\Delta\text{Dec} = 1^\circ 6'$, протяжённость по прямому восхождению $0^h < \text{R.A.} < 5^h$ (слева направо). Сверху вниз — анизотропия РИ, свободно-свободная компонента, вращательная пыль и синхротронное излучение. Единицы измерения — миллиградусы антенной температуры (mK).

также было включено в модель, как и тепловая пылевая компонента.

Модели излучения РИ, синхротрона, свободно-свободного излучения и излучения пыли находятся в свободном доступе. Так, карты анизотропии РИ для различных космологических моделей можно получить с помощью пакета программ HEALPix [40]; карты синхротронного излучения для всей небесной сферы приводятся в работах [14] и [18]; компилятивная карта свободно-свободного излучения, составленная по наблюдениям в линии $\text{H}\alpha$, приводится в работе [21]; карта излучения тепловой пыли по наблюдениям IRAS рассматривается в работе [22]; карты излучения аномальной пыли (предположительно вращательной) приведены в работах [28] и [30]. Кроме того, в рамках подготовки эксперимента Planck была создана модель небесной сферы в микроволновом диапазоне *Planck Sky Model* [41], где сведены воедино все разрозненные данные по излучению Галактики и внегалактических компонент, а так же было проведено экстраполирование на те масштабы и частоты, где наблюдательные данные отсутствуют.

При моделировании карт на разных частотах использовался температурный спектральный индекс для синхротронной компоненты $\beta_{\text{synch}}^T = -3.0$, а для свободно-свободного излучения $\beta_{\text{ff}}^T = -2.16$. РИ предполагалось чернотельным с температурой $T_{\text{CMB}} = 2.726$ К, а спектральная зависимость для вращательной пыли была взята из работы [23]. Для тепловой пыли, которая излучает довольно слабо на низких частотах, была выбрана однокомпонентная модель с $T_{\text{dust}} = 18.0$ К и $\alpha = 2.0$.

В пространственной же области предполагалось, что спектр мощности галактических компонент на мелких масштабах зависит от номера мультиполя как $\sim l^{-3}$.

Для моделирования наблюдений на РАТАН-600 из исходных модельных карт всей небесной сферы в формате HEALPix конструировались полоски, соответствующие зенитному обзору размером $0^h < \text{R.A.} < 5^h$ и $40^\circ.7 < \text{Dec} < 42^\circ.3$. Расстояние между наблюдаемыми сканами было равно 6 угл. минутам, что обусловило выбор размера пиксела в модельных площадках 6×6 угл. минут. Используемые полоски приведены на Рис. 4. Для большего соответствия моделей реальным данным полоски обрабатывались тем же фильтром (Рис. 1), что и настоящие транзитные сканы. Шумовой вклад радиометров моделировался с использованием реальных шумов, полученных из полуразностных сканов.

4.1.1. Сравнение уровня модельного сигнала с уровнем реального сигнала зенитного обзора

Поскольку имелись как модели компонент излучения, так и реальные реализации шума, было полезно оценить возможности наблюдения в нашем случае той или иной компоненты излучения. На Рис. 5 приведены модельные спектры мощности основных компонент излучения на частотах РАТАН-600. Для расчёта использовались модельные карты всего неба из *Planck Sky Model* v1.6 [41]. Для определения вклада компонент на высоких галактических широтах плоскость Галактики подавлялась маской шириной $\pm 25^\circ$ относительно галактического экватора. Вместе с модельными спектрами мощности

на рисунках приведены уровни шумов радиометров РАТАН-600, реализованные в зентинном обзоре и интерполированные в область C_l . Для расчёта уровня шума в C_l использовалось известное соотношение

$$C_l = \Omega_p \sigma^2, \quad (16)$$

где Ω_p — площадь пиксела в стерadiansах, а σ^2 — дисперсия шума в пикселе. В нашем случае сканы РАТАН-600 наблюдались с шагом 6 угл. минут между сечениями, и после компрессии сканы группировались в площадки размером 553×16 пикселов (аналогичные приведённым на Рис. 4) с размером пиксела 6×6 угл. минут, что соответствует $\Omega_p = 3.046 \cdot 10^{-6}$ srad. Среднеквадратические величины шума в пикселе для разных частот, полученные по полуразностным сканам, приведены в Табл. 2. Стоит, однако, отметить, что реальные уровни шумов в гармонической области, будут варьироваться в зависимости от масштаба, т.к. на больших масштабах была применена фильтрация. Поэтому, как будет показано ниже, реальный шум на масштабах $l > 500$ будет больше приведенного в Табл. 2.

Из Рис. 5 видно, что, согласно моделям, отношение сигнал/шум порядка единицы для синхротрона и свободно-свободной компоненты реализуется на масштабах $l \approx 100 - 300$. Как показано в Разделе 2, масштабы $l < 500$ сильно отягощены атмосферными флуктуациями и поэтому подавляются фильтром. Стоит, однако, отметить, что все приведённые оценки модельно зависимы, а сами модели на мелких масштабах в большой степени являются интерполяцией. Также, при использовании многочастотной методики разделения компонент в гармонической области эффективный уровень шума будет существенно ниже, и отношение $S/N = 1$ будет реализовано на более мелких масштабах.

На Рис. 6 сравнены спектры мощности модельных площадок с Рис. 4 на опорной частоте 30 ГГц и спектры мощности модельных карт компонент всего неба с удалением плоскости Галактики в области $\pm 25^\circ$. Видно, что модельные спектры площадок довольно хорошо соответствуют высокоширотным спектрам компонент.

Для создания модели излучения на частотах наблюдения РАТАН-600 с использованием моделей компонент с Рис. 4 создавалась их линейная комбинация с весами, соответствующими элементам матрицы частотного отклика $F_{\nu p}$ в (1). Хотя размер пиксела был достаточно большой, для достоверности производилась свертка с диаграммой, которая моделировалась как двумерная Гауссиана с параметрами полуширин по RA и Dec, взятыми из работы [42]. После свёртки в Фурье-области к

картам добавлялись реализации шума из полуразностных записей (см. Табл. 2). В моделирование и последующий анализ было решено не включать частоты 21.65 и 30.0 ГГц по причине слишком высокого уровня шума из-за малого накопления.

4.1.2. Восстановление спектров мощности компонент

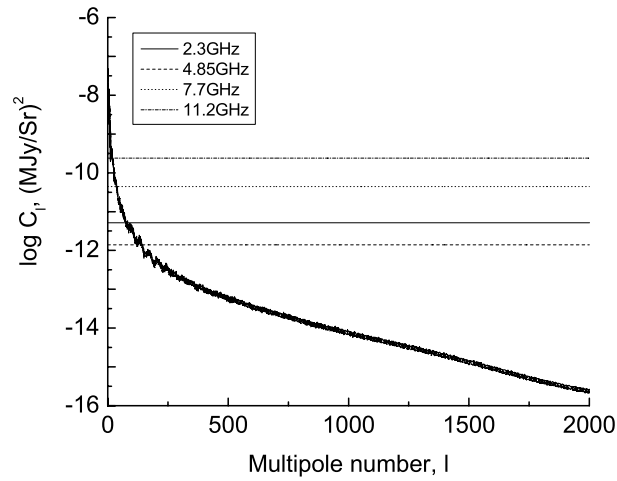
Хотя для работы использовались только 4 канала с частотами от 2.3 до 11.2 ГГц, при восстановлении компонент проводилась их экстраполяция на опорную частоту $\nu = 30$ ГГц для облегчения сравнения с более высокочастотными наблюдениями в экспериментах WMAP и Planck.

При использовании алгоритма разделения компонент на модельных данных выяснилось, что восстановления РИ и излучения вращательной пыли практически не происходит, и восстановленный сигнал имеет очень низкую амплитуду. Конечно, данный частотный диапазон 2.3–11.2 ГГц совсем не подходит для наблюдения РИ, поэтому это неудивительно. Выбранная модель вращательной пыли (закон излучения и карта распределения излучения) не даёт существенного вклада на частотах наблюдения. Ситуация со свободно-свободной компонентой несколько лучше, и при работе с реальными данными имеет смысл проверить устойчивость решения для этой компоненты при варьировании уровня априорного спектра мощности.

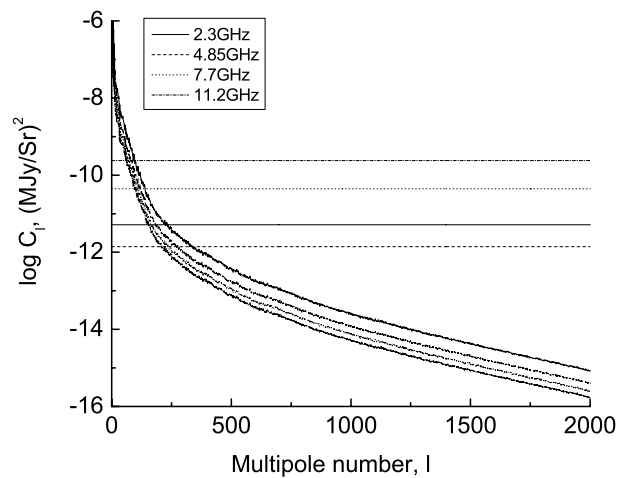
Восстановленный спектр мощности галактического синхротрона показывает в этом тесте умеренные ошибки (по сравнению с другими компонентами) на масштабах $500 < l < 1000$. В этом случае тоже полезно провести проверку на устойчивость решения по отношению к выбранному априорному спектру мощности, что и будет сделано ниже.

4.1.3. Устойчивость решения для синхротронной компоненты по отношению к выбранному априорному спектру мощности

Для запуска алгоритма разделения компонент помимо параметров эксперимента (уровни шума, профиль диаграммы направленности) необходимо задать априорный спектр мощности компонент \mathbf{C} , который служит масштабом для некоррелированной компоненты сигнала \mathbf{h} (8). В некоторых случаях этот спектр хорошо известен, как в случае РИ, но в общем случае его точный вид неизвестен. Так, для синхротронной компоненты \mathbf{C} можно рассчитать, используя данные с низким разрешением ($l < 100$) из работ [14] и [15]. В литературе встречаются попытки создания моделей на мелких масштабах с использованием искусственного Гауссова заполнения [18].



(a) Свободно-свободная компонента



(b) Синхротронная компонента

Рис. 5. Предполагаемый уровень мощности свободно-свободного (а) и синхротронного (б) излучения по сравнению с реализованной чувствительностью зенитного обзора. Для расчёта использовались модельные карты компонент всей небесной сферы с подавлением плоскости Галактики в области $\pm 25^\circ$ относительно галактического экватора.

Так как целью данной работы является получение достоверной информации о мощности компонент на масштабах, которые ранее не наблюдались, необходимо проверить, как ведёт себя несмещённая оценка спектра мощности при использовании разных априорных спектров. В случае модели у нас есть возможность сравнить результат с исходными характеристиками модели, которая нами использовалась для конструирования карт на интересующих нас частотах.

На Рис. 7 показаны спектры мощности синхро-

тронной компоненты, сделанные с разными априорными спектрами мощности. Из графиков видно, что на мелких масштабах $l > 1000$ решения стремятся к соответствующим априорным спектрам мощности. На более крупных масштабах порядка $l \approx 500$, однако, все решения (кроме случая с очень слабым сигналом) сходятся к истинному уровню, определяемому спектром мощности, который использовался при создании модели.

Таблица 2. Статистические характеристики площадок, построенных по полуразностным записям зенитного обзора

Частота, ГГц	2.3	4.83	7.7	11.2
Величина г.т.с., T_a , К (исходные площадки, 177200×17 пикселей)	1.4×10^{-2}	3.0×10^{-3}	7.9×10^{-3}	6.7×10^{-3}
Величина г.т.с., T_a , К (после компрессии, размером 553×16 пикселей $6' \times 6'$)	8.2×10^{-3}	9.5×10^{-4}	2.1×10^{-3}	2.4×10^{-3}
К-т перевода T_a , МДж/Сг	0.163	0.717	1.82	3.85
Уровень C_l шума, (МДж/Сг) ² (белая компонента, (16))	5.2×10^{-12}	1.4×10^{-12}	4.4×10^{-11}	2.7×10^{-10}

4.2. Результаты обработки данных зенитного обзора РАТАН-600

Теперь вышеизложенный алгоритм можно применить к реальным площадкам на Рис. 2, где точное решение неизвестно и в качестве априорной информации можно использовать только модели.

При использовании алгоритма разделения компонент по реальным данным Зенитного обзора были получены результаты, качественно повторяющие ранее полученные по модельным площадкам. Восстановления РИ и излучения вращательной пыли также не наблюдается. Для синхротронной и свободно-свободной компоненты, как наиболее ярких источников излучения на низких частотах, была проведена оценка устойчивости решения по отношению к априорным спектрам мощности, аналогичная тому, что было сделано в разделе 4.4.1.4.1.3. Для этого разделение компонент проводилось с априорными спектрами мощности, масштабированными с различными коэффициентами.

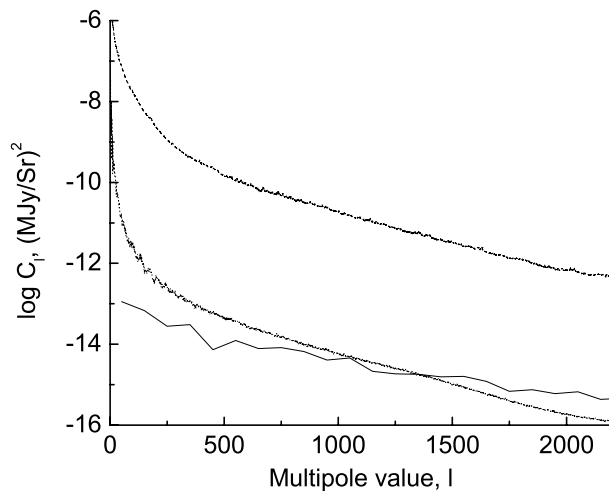
Результаты проверки на устойчивость приведены на Рис. 8. На нем видно, что для синхротрона решение сходится на масштабах $l < 1000$ для всех вариантов априорного спектра, кроме самого слабого (коэффициент 0.04). Для свободно-свободной компоненты решение сходится для сильно масштабированных вариантов априорного спектра, с коэффициентом больше 25, что говорит о несоответствии выбранной модели реальной ситуации, по крайней мере на изучаемой площадке.

Для синхротронной компоненты наименьшие значения ошибок получаются при использовании коэффициента масштабирования $K_p \approx 4.0$. На

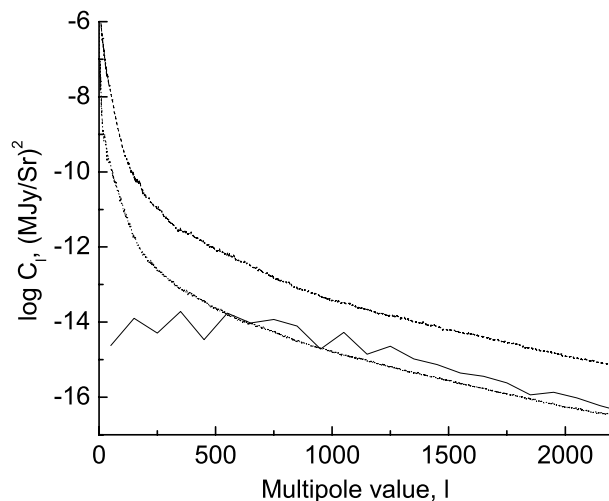
Рис. 9 приведено отношение $\hat{C}_l^{\text{unb}}/B_{BG}$, где B_{BG} характеризует влияние фильтра, применявшегося для подавления атмосферных флуктуаций (см. Рис. 1). Для сравнения там же приведены модельные спектры мощности синхротронной компоненты.

Из рисунка видно некоторое превышение уровня синхротронного излучения над моделью в диапазоне масштабов $l > 500$. Следует отметить, что применяемые в настоящее время модели на мелких масштабах ввиду отсутствия наблюдений содержат искусственно генерируемый Гауссовый шум, и такое несоответствие не свидетельствует об ошибках в наблюдениях и обработке. Поэтому есть все основания полагать, что реальный уровень мощности синхротронной компоненты, как следует из графика на Рис. 9 в интервале масштабов $500 < l < 1000$ на 30 ГГц составляет порядка $C_l \approx 4 \times 10^{-14} - 1 \times 10^{-13}$ (МДж/Сг)².

Для свободно-свободной компоненты наименьшие ошибки достигаются при масштабировании модельного априорного спектра мощности на два порядка, $K_p \approx 100$. На Рис. 10 показаны модельные спектры мощности свободно-свободной компоненты вместе с восстановленным спектром мощности $\hat{C}_l^{\text{unb}}/B_{BG}$ (с учётом влияния фильтра). Из Рис. 10 видно, что в диапазоне масштабов $500 < l < 1000$ на 30 ГГц уровень восстановленного спектра мощности на два порядка превышает модельный высокоширотный спектр мощности. Это может быть связано как с морфологией конкретной площадки, выбранной для зенитного обзора, так и с неточностью самой модели. Вместе с тем можно говорить об уровне мощности свободно-свободной



(a) Свободно-свободная компонента



(b) Синхротронная компонента

Рис. 6. Соответствие модельных спектров мощности свободно-свободной (а) и синхротронной (b) компоненты на площадках с Рис. 4 статистике на высоких галактических широтах. Для расчёта использовались модельные карты компонент всей небесной сферы на частоте 30 ГГц (длинный пунктир), а так же такие же карты, но с подавлением плоскости Галактики в области $\pm 25^\circ$ (короткий пунктир). Сплошной линией изображены спектры мощности модельных площадок на той же частоте, медианное усреднение проводилось по интервалам масштабов $\Delta l = 100$. На масштабах $l < 500$ виден эффект вычитания фона для подавления флуктуаций атмосферы.

компоненты в этом диапазоне масштабов порядка $C_l \approx 7 \times 10^{-13} - 5 \times 10^{-12} \text{ (MJy/Sr)}^2$.

В Табл.3 и 4 приведены расчётные уровни мощности диффузной синхротронной и свободно-свободной компонент излучения на центральных частотах радиометрического комплекса

РАТАН-600. Аппроксимация производилась от опорной частоты $\nu_c = 30 \text{ ГГц}$ в соответствии с принятыми при обработке спектральными индексами. Для синхротрона использовался спектральный индекс $\beta_{\text{synch}} = -1.0$ ($\beta_{\text{synch}}^T = -3.0$ в температурных единицах), а для свободно-свободной компоненты

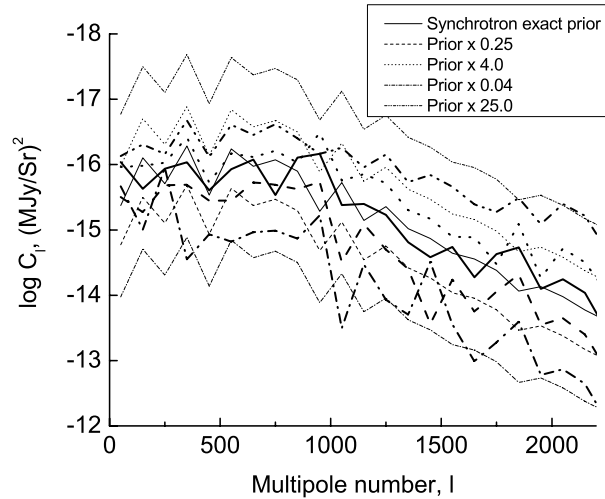


Рис. 7. Устойчивость несмещенной оценки спектра мощности для синхротронной компоненты на опорной частоте 30 ГГц по отношению к априорным спектрам мощности. Кроме полного соответствия (чёрная линия) использовалось масштабирование с коэффициентами $K_p = 0.04, 0.25, 4, 25, 50$ и 100 . Тонкими линиями различным штрих-пунктиром показаны априорные спектры мощности, толстыми — несмещенные оценки восстановленных спектров.

Таблица 3. Аппроксимация уровня спектра мощности для масштабов $l = 550, 750$ и 1050 для синхротронной компоненты на частоты РАТАН-600. Предполагаемый спектральный индекс $\beta_{\text{synch}} = -1.0$.

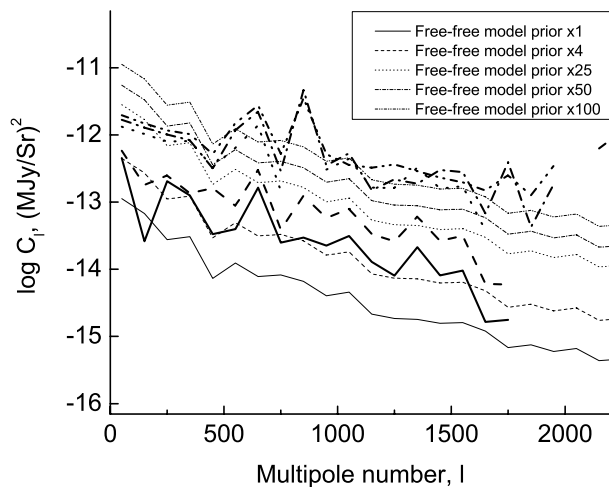
ν_c , ГГц	$C_l, (\text{MJy/Sr})^2$, $l = 550 \pm 50$	$C_l, (\text{MJy/Sr})^2$, $l = 750 \pm 50$	$C_l, (\text{MJy/Sr})^2$, $l = 1050 \pm 50$
2.3	$1.5 \times 10^{-11} \pm 2.2 \times 10^{-12}$	$8.1 \times 10^{-12} \pm 2.2 \times 10^{-12}$	$4.5 \times 10^{-12} \pm 1.5 \times 10^{-12}$
4.85	$3.5 \times 10^{-12} \pm 5.1 \times 10^{-13}$	$1.8 \times 10^{-12} \pm 5.1 \times 10^{-13}$	$1.0 \times 10^{-12} \pm 3.3 \times 10^{-13}$
7.7	$1.4 \times 10^{-12} \pm 2.0 \times 10^{-13}$	$7.2 \times 10^{-13} \pm 2.0 \times 10^{-13}$	$4.0 \times 10^{-13} \pm 1.3 \times 10^{-13}$
11.2	$6.5 \times 10^{-13} \pm 9.4 \times 10^{-14}$	$3.4 \times 10^{-13} \pm 9.4 \times 10^{-14}$	$1.9 \times 10^{-13} \pm 6.2 \times 10^{-14}$
21.65	$1.7 \times 10^{-13} \pm 2.5 \times 10^{-14}$	$9.0 \times 10^{-14} \pm 2.5 \times 10^{-14}$	$5.0 \times 10^{-14} \pm 1.7 \times 10^{-14}$
30.0	$9.0 \times 10^{-14} \pm 1.3 \times 10^{-14}$	$4.7 \times 10^{-14} \pm 1.3 \times 10^{-14}$	$2.6 \times 10^{-14} \pm 8.6 \times 10^{-15}$

излучения использовалось значение $\beta_{\text{ff}} = -0.16$ ($\beta_{\text{ff}}^T = -2.16$ в единицах температуры).

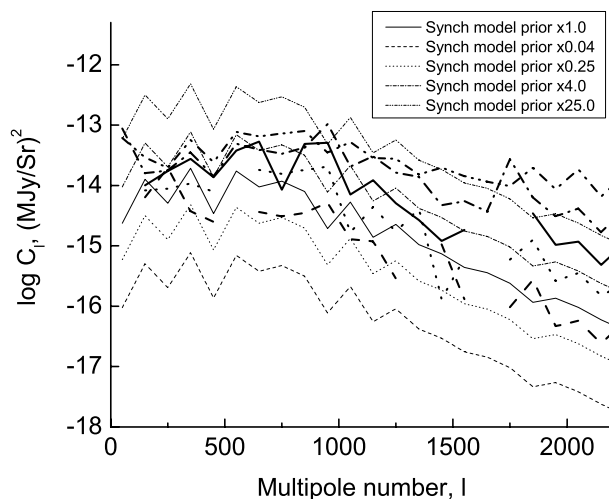
5. ВЫВОДЫ

В данной статье приводятся оценки мощности излучения галактического свободно-свободного излучения и синхротрона в интервале масштабов $500 < l < 1000$ ($20' < \theta < 40'$) по низкочастотным наблюдениям $2.3 \text{ ГГц} < \nu_c < 11.2 \text{ ГГц}$ на РАТАН-600.

Показано, что несмотря на значительный шум приёмников и, как следствие, значительные ошибки измерения спектра мощности, уровень излучения обоих галактических компонент в основном согласуется с моделями, принятыми в настоящее время в литературе [18, 41]. Установлено, что яркость свободно-свободной компоненты на выбранной площадке зенитного обзора почти на порядок выше, чем это следует из модели для высоких галактических широт, используемой в работе [41],



(a) Свободно-свободная компонента



(b) Синхротронная компонента

Рис. 8. Устойчивость восстановления спектра мощности по наблюдаемым площадкам для свободно-свободной (а) и синхротронной (b) компоненты. Априорные спектры мощности на опорной частоте 30 ГГц показаны тонкими штрих-пунктирными линиями, несмещенные оценки восстановленного спектра мощности — толстыми.

что приводит к различию в спектрах мощности почти на 2 порядка. Тем не менее, спектр мощности сильно зависит от морфологии конкретной области, и не превышает уровень низкоширотного спектра мощности для этой модели, что позволяет говорить об общем соответствии данных оценок и выбранных моделей галактических компонент.

Полученные оценки будут использованы в даль-

нейшем при обработке данных с космологических экспериментов WMAP и Planck, и особенно полезны они будут для учёта излучения Галактики на частотах ниже 100 ГГц — это все частотные диапазоны WMAP, три диапазона Planck LFI и диапазон 100 ГГц Planck HFI.

Проблема вращательной пыли требует более тщательного изучения и новых наблюдений на бо-

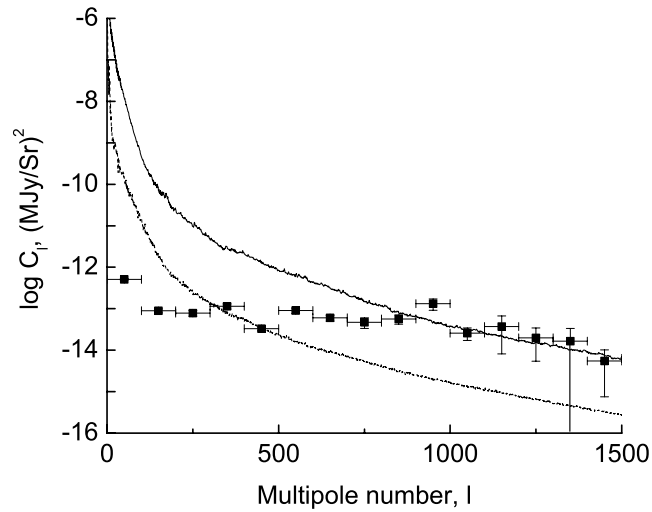


Рис. 9. Результаты восстановления спектра мощности синхротрона с наименьшими ошибками, с учётом влияния проведения фона для подавления атмосферных флуктуаций. Также для сравнения сплошной линией показан модельный низкоширотный, а пунктирной — высокоширотный спектр мощности синхротронной компоненты, рассчитанный по карте всего неба в сферических гармониках.

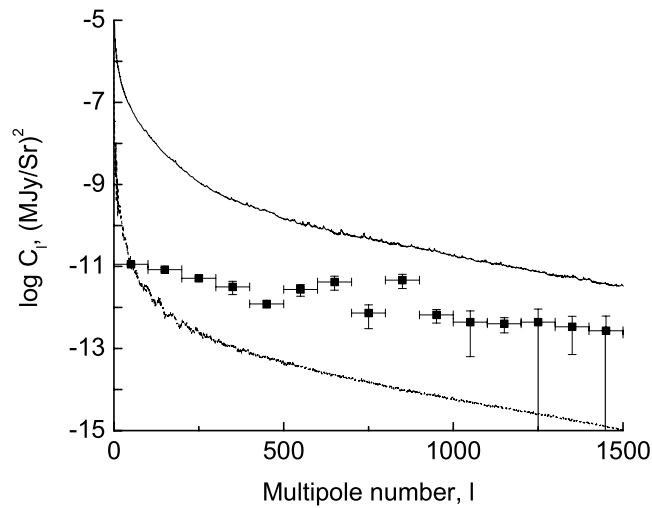


Рис. 10. Результаты восстановления спектра мощности свободно-свободной компоненты с наименьшими ошибками, с учётом влияния проведения фона для подавления атмосферных флуктуаций. Также для сравнения сплошной линией показан модельный низкоширотный, а пунктирной — высокоширотный спектр мощности свободно-свободной компоненты, рассчитанный по карте всего неба в сферических гармониках.

Таблица 4. Аппроксимация уровня спектра мощности для масштабов $l = 550, 750$ и 1050 для свободно-свободной компоненты на частоты РАТАН-600. Предполагаемый спектральный индекс $\beta_{ff} = -0.16$

ν_c , ГГц	$C_l, (\text{MJy/Sr})^2$, $l = 550 \pm 50$	$C_l, (\text{MJy/Sr})^2$, $l = 750 \pm 50$	$C_l, (\text{MJy/Sr})^2$, $l = 1050 \pm 50$
2.3	$5.4 \times 10^{-12} \pm 1.7 \times 10^{-12}$	$1.4 \times 10^{-12} \pm 8.3 \times 10^{-13}$	$8.5 \times 10^{-13} \pm 7.1 \times 10^{-13}$
4.85	$4.6 \times 10^{-12} \pm 1.4 \times 10^{-12}$	$1.2 \times 10^{-12} \pm 7.0 \times 10^{-13}$	$7.2 \times 10^{-13} \pm 6.0 \times 10^{-13}$
7.7	$4.1 \times 10^{-12} \pm 1.3 \times 10^{-12}$	$1.1 \times 10^{-12} \pm 6.3 \times 10^{-13}$	$6.4 \times 10^{-13} \pm 5.4 \times 10^{-13}$
11.2	$3.7 \times 10^{-12} \pm 1.2 \times 10^{-12}$	$9.7 \times 10^{-13} \pm 5.7 \times 10^{-13}$	$5.9 \times 10^{-13} \pm 4.9 \times 10^{-13}$
21.65	$3.1 \times 10^{-12} \pm 9.7 \times 10^{-13}$	$8.2 \times 10^{-13} \pm 4.8 \times 10^{-13}$	$4.9 \times 10^{-13} \pm 4.1 \times 10^{-13}$
30.0	$2.8 \times 10^{-12} \pm 8.7 \times 10^{-13}$	$7.3 \times 10^{-13} \pm 4.3 \times 10^{-13}$	$4.4 \times 10^{-13} \pm 3.7 \times 10^{-13}$

лее высоких частотах. В частности, большие надежды возлагаются на проводимые в данный момент наблюдения на частоте $\nu_c = 30.0$ ГГц.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа проводилась при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 09-02-12169-офим) и Министерства образования и науки Российской Федерации (гос. контракты 02.518.11.7167 и 16.518.11.7062). Авторы выражают благодарность Майоровой Е.К. за полезные обсуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- N. Mandolesi, F. Villa, and L. Valenziano, *Advances in Space Research* **30**, 2123 (2003).
- F. R. Bouchet, astro-ph/0911.3101 (2009).
- F. Bouchet, R. Gispert, *New Astronomy* **4**, 443 (1998).
- J. Delabrouille, J.-F. Cardoso, and G. Patanchon, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **346**, 1089 (2003).
- D. Maino, A. Farusi, C. Baccigalupi, et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **334**, 53 (2002).
- H. K. Eriksen, J. B. Jewell, C. Dickinson, et al., *Astrophys. J.* **676**, 10 (2008).
- A. Bonaldi, L. Bedini, E. Salerno, et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **373**, 271 (2006).
- V. Stolyarov, M. P. Hobson, M. A. J. Ashdown, and A. N. Lasenby, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **336**, 97 (2002).
- S. Leach et al., *Astronom. and Astrophys.* **491**, 597 (2008).
- S. Eidelman et al., *Phys. Rev. B* **592**, 1 (2004).
- G. Hinshaw et al., *Astrophys. J. Suppl.* **170**, 288 (2007).
- M. Nolta et al., *Astrophys. J. Suppl.* **180**, 296 (2009).
- U. Seljak and M. Zaldarriaga, *Astrophys. J.* **469**, 437 (1996).
- C. G. T. Haslam, C. J. Salter, H. Stoffel, and W. E. Wilson, *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **47**, 1 (1982).
- P. Reich and W. Reich, *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **63**, 205 (1986).
- J. Jonas, E. Baart, and G. Nicolson, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **297**, 977 (1998).
- B. Gold et al., *Astrophys. J. Suppl.* **180**, 265 (2009).
- G. Giardino et al., *Astronom. and Astrophys.* **387**, 82 (2002).
- R. Reynolds et al., *Publ. Astron. Soc. Aust.* **15**, 14 (1998).
- J. E. Gaustad, P. R. McCullough, W. R. Rosing, and D. V. Buren, *PASP* **113**, 1326 (2001).
- C. Dickinson, R. D. Davies, and R. J. Davis, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **341**, 369 (2003).
- D. Schlegel, D. Finkbeiner, and M. Davis, *Astrophys. J.* **500**, 525 (1998).
- B. T. Draine and A. Lazarian, *Astrophys. J.* **508**, 157 (1998).
- R. D. D. Davies et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **370**, 1125 (2006).
- S. Casassus et al., *Astrophys. J.* **639**, 951 (2006).
- E. J. Murphy et al., *Astrophys. J.* **709**, L108 (2010).
- C. T. Tibbs et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **402**, 1969 (2010).
- A. Bonaldi et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **382**, 1791 (2007).
- G. Dobler and D. P. Finkbeiner, *Astrophys. J.* **680**, 1222 (2008).
- M.-A. Miville-Deschênes et al., *Astronom. and Astrophys.* **490**, 1093 (2008).
- Yu. N. Parijskij, *IEEE Antennas Propagation Magazine* **35**, 7 (1993).
- P. G. Tsybulev et al., *Astrophysical Bulletin* **62**, 193 (2007).

33. Ю. Н. Парийский и др., *Тезисы докладов 25-й конференции “Актуальные проблемы внегалактической астрономии”* (Пушино, Россия, 2008), <http://www.prao.ru/conf/registration/docs.php>.
34. N. N. Bursov, Candidate’s Dissertation in Mathematics and Physics (SAO RAS, Nizhniy Arkhyz, 2003).
35. Yu. N. Parijskij, A. V. Chepurinov, and N. N. Bursov, in *Proceedings of the Second International A. D. Sakharov Conference on Physics*, Moscow, Russia, 1996, Ed. by I. M. Gremin, A. M. Semikhatov (World. Sci., London, 1997), p. 152.
36. Н. Н. Бурсов и Е. К. Майорова, в *материалах конференции Радиотелескопы РТ-2002, Пушино, Россия, 2002*, ред. Ю. П. Илясов (Научный центр в Пушино, 2002), с. 26.
37. Описание радиометров RATAN-600, <http://www.sao.ru/hq/lrk>
38. M. P. Hobson, A. W. Jones, A. N. Lasenby, and F. R. Bouchet, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **300**, 1 (1998).
39. M. P. Hobson and A. N. Lasenby, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **298**, 905 (1998).
40. K. Górski et al., *Astrophys. J.* **622**, 759 (2005).
41. S. Ricciardi, *New Ast. Rev.* **51**, 310 (2007).
42. Y. Y. Kovalev et al., *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **139**, 545 (1999).

SMALL-SCALE GALACTIC EMISSION FLUCTUATION OBSERVATIONS WITH RATAN-600 RADIO TELESCOPE

V. A. Stolyarov, Yu. N. Parijskij, N. N. Bursov, M. G. Mingaliev, T. A. Semenova, P. G. Tsybulev

We present the estimates of Galactic synchrotron and free–free emission power at intermediate and small scales ($500 < l < 1000$, $20' < \theta < 40'$), based on the RATAN-600 observations (SAO RAS). The observations were conducted in the frequency range of 2.3–11.2 GHz using the transit scan mode, in the declination range of $40.7^\circ < \delta < 42.3^\circ$. The power spectrum estimates of synchrotron and free-free components were obtained. They can be further used in the data processing stage of the high-resolution cosmological experiments like Planck.

Keywords: *Galaxy: foregrounds—Galaxy: diffuse emission*