

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ

На правах рукописи
УДК 524.827-77

Семенова Тамара Азретовна

**Исследование некоторых фоновых составляющих радиоизлучения
Вселенной в наземных наблюдениях реликтового фона**

Специальность 01.03.02 – астрофизика, радиоастрономия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Архыз -2009

Работа выполнена в Специальной астрофизической обсерватории РАН

Научный руководитель:

академик РАН Парийский Юрий Николаевич
(Специальная астрофизическая обсерватория РАН)

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук М.Г. Ларионов
(Астрокосмический центр Физического
Института им. П.Н. Лебедев РАН
(АКЦ ФИАН), г. Москва.

доктор физико-математических наук И.В. Госачинский
(Санкт-Петербургский филиал
Специальной астрофизической
обсерватории РАН.

Ведущая организация:

Главная астрономическая обсерватория РАН, г. Санкт-Петербург

Защита состоится «21» октября 2009 года в 11.30 часов на заседании
Диссертационного совета Д002.203.01 Специальной астрофизической
обсерватории РАН по адресу: 369167, п. Нижний Архыз, Карачаево-
Черкесия, САО РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке САО РАН.

Автореферат разослан « » сентября 2009г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

Майорова Е.К.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Основная энергия фонового излучения Вселенной связана с реликтовым фоном. Этот фон был обнаружен наземными средствами в 60-х годах прошлого века. Он оказался изотропным и все попытки измерить его анизотропию долгие годы были безуспешными. Появились эволюционные модели Вселенной, допускающие малую пространственную анизотропию температуры dT/T на уровне 10^{-5} .

Первые теории формирования наблюдаемой Вселенной предсказывали различный характер реликтового фона. Однако уже первые исследования в Пулково [Парийский Ю.Н. и др., 1970], на РАТАН-600 [Парийский Ю.Н. и др., 1977] и в США [Parijski Yu.N., 1973] с помощью наиболее чувствительных радиометров того времени показали противоречие с простыми теориями [Парийский Ю.Н. и др., 1986].

Исключительное значение приобретает проблема учета других фоновых радиоизлучений, мешающих исследованию реликтового излучения. Для экспериментов типа Planck это, прежде всего, Галактика и шум фоновых радиоисточников, практически не исследованных в коротком сантиметровом и миллиметровом диапазоне длин волн. Мешающим фоновым излучением также является предсказанный недавно шум заряженных макромолекул в диапазоне 1-3 см. Основные надежды – использование существенного различия зависимости яркости мешающих фоновых компонентов от частоты. В первом приближении считается, что спектр мощности синхротронного излучения Галактики оценивается формулой: $C_l \sim l^3 \nu^{-6}$ и $C_l \sim l^3 \nu^{-4}$ для свободно-свободного излучения, где C_l – компонента спектра при разложении шумов неба по полиномам Лежандра, $l = 2\pi/\theta$ – номер мультиполя в разложении T_B неба по сферическим гармоникам, θ – угловой размер пространственных неоднородностей, ν – частота излучения.

Эти фоновые составляющие достаточно хорошо регистрируются в дециметровом диапазоне на обычных радиотелескопах, у которых разрешение недостаточно для исследований анизотропии реликтового фона. Поэтому необходима далекая экстраполяция их свойств, как по частоте (от дециметровых к миллиметровым длинам волн), так и по угловым масштабам (от одного градуса до нескольких минут дуги).

Дальнейшее продвижение ожидается с расширением фронта исследований из космоса. Проекты ближайших лет должны качественно изменить точность экспериментов по анизотропии реликтового фона, которые будут проведены в оптимальных для выделения основных мод угловых масштабах, предсказанных теорией 90-х годов (0.2 - 2 град.).

Проблема анизотропии реликтового излучения стимулирует также активность наземных экспериментов. На Земле доминирует шум атмосферы, и стало ясно, что простые наземные эксперименты не могут устранить этот шум.

РАТАН-600 оказался подходящим инструментом для более глубоких исследований с достаточным для реликтового фона чувствительностью и

разрешением. Глубокий обзор, проводящийся сейчас на РАТАН-600, важен и для уточнения роли фоновых дискретных радиоисточников в экспериментах по анизотропии реликтового фона, и для выявления популяции источников с «инверсионными» спектрами.

Актуальность исследования составляющих радиоизлучения Вселенной и оценивания ограничений на точность экспериментов по исследованию реликтового фона определяется как космическими, так и наземными наблюдениями. Результаты данной диссертации получены в рамках проекта «Генетический код Вселенной» – основной программы, проводящейся на РАТАН-600.

Цели и задачи исследования:

1. Оценка атмосферного шума, как основного источника помех в изучении реликтового излучения наземными средствами.
2. Оценка вклада дипольного излучения макромолекул («spinning dust») в сантиметровом диапазоне волн. Оценка поляризации пылевого облака в области созвездия Персея.
3. Исследование синхротронного излучения Галактики и его вклада в изучение реликтового фона. Обработка данных на дециметровых волнах, где доминирует синхротронное излучение на масштабах, существенных для космологии.
4. Исследование радиоспектров объектов нового RZF-каталога (Ratan Zenith Field), полученного на РАТАН-600 и анализ популяций слабых радиоисточников. Выделение объектов с инверсионными спектрами, наиболее мешающими при изучении реликтового фона.
5. Отождествление радиоисточников RZF-каталога. Оценка изменений распределения по спектральным индексам при переходе к предельно слабым радиоисточникам и уточнение их роли в экспериментах по анизотропии реликтового фона.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты исследования атмосферного излучения и методов чистки данных наблюдений от атмосферного шума. Рекомендации для эффективного использования накопленных данных в околосенитном обзоре на РАТАН-600 при изучении фоновых излучений Вселенной.
2. Результаты наблюдений, обработки и анализа радиоизлучения мощного пылевого облака в области созвездия Персея и оценка его степени поляризации. Оценка вклада дипольного излучения макромолекул в Галактике, как мешающего фона при изучении характеристик реликтового излучения.
3. Оценка вклада синхротронного излучения Галактики в фоновое излучение Вселенной по результатам обработки 400 суточных сканов наблюдений на 4 длинах волн (7.6, 13, 31 и 49 см).
4. Результаты анализа радиоисточников RZF-каталога. Оценки спектрального распределения для исследуемой выборки популяций слабых объектов. Оценка роли источников с инверсионными спектрами в будущих экспериментах по анизотропии реликтового фона.

Основные результаты диссертации:

1. На основании анализа многолетних, многочастотных данных, полученных на РАТАН-600, показано, что большие наземные радиотелескопы могут успешно применяться для комплексных исследований реликтового фона и давать наиболее полную информацию о важных частотно-зависящих фоновых излучениях с высокой чувствительностью на масштабах Сахаровских осцилляций.
2. По результатам обработки 1700 часовых сканов наблюдений в околозенитной области, получено, что среднее положение излома спектра мощности по шкале частот равен 0,1 Гц на волне 1.38 см, а на волнах длиннее и короче 1.38 см излом смещен в сторону более низких частот ~ 0.03 Гц, что ограничивает исследования анизотропии реликтового фона на $l < 1000$ без мер борьбы с атмосферным шумом. Наиболее эффективной оказалась «двумерная селекция» данных на плоскости «время-угловой масштаб» с помощью вейвлет-анализа. Такая фильтрация шумов атмосферы позволяет проводить исследования анизотропии реликтового фона в сантиметровом диапазоне длин волн на угловых масштабах, важных для космологии.
3. Степень поляризации пылевого облака в области созвездия Персея, по результатам обработки данных РАТАН-600 оказалась незначительной ($\sim 2\%$). На высоких галактических широтах число пылинок, пропорциональное числу водородных атомов на луче зрения, оказалось в 1000 раз меньше, чем в облаке в области созвездия Персея. Сделан вывод, что дипольное излучение макромолекул имеет малое влияние на исследования поляризации реликтового фона.
4. Получено, что двухчастотный (74 см–7.6 см) спектральный индекс фонового излучения в околозенитном обзоре не является постоянным, а испытывает пространственные вариации даже на высоких галактических широтах.
Среднее значение среднеквадратичного отклонения отсчетов для синхротронного шума Галактики в полосе околозенитного обзора на волне наблюдения 7.6 см равно $dT = 51 \mu K \pm 3.3 \mu K$ для $l = 2000$, уровень которого позволяет проводить исследование реликтового излучения на коротких сантиметровых и миллиметровых волнах.
5. В результате исследований объектов RZF-каталога получено, что доля объектов с инверсионными спектрами составляет около 1% при $\alpha > 1$ и 5% при $\alpha > 0$ ($S \sim \nu^{-\alpha}$). Это – небольшая доля и соответствующие области можно экранировать от источников при изучении реликтового фона.

Новизна и научная значимость.

Значительно детальнее, чем ранее исследовано влияние атмосферного шума на наземные эксперименты по анизотропии реликтового фона и выработаны рекомендации по селекции и чистке атмосферного шума.

Дипольное излучение макромолекул ранее исследовалось, но наблюдения были противоречивыми. В данной работе получены новые независимые оценки, которые сравнены с современными данными.

Исследованы полные, предельно глубокие, разрезы неба в околозенитном обзоре на масштабах, недоступных другим инструментам.

Полученные, более точные сведения о зависимости спектра синхротронного излучения от координат на небесной сфере в области зенитного обзора, позволили уточнить особенности синхротронного фона Галактики на крупных масштабах (на малых мультиполях).

По результатам исследования статистики спектральных свойств радиоисточников объектов RZF-каталога оценена роль объектов с инверсионными спектрами.

Научная и практическая ценность работы

Полученные результаты по фоновым составляющим важны для практического применения в экспериментах по исследованию реликтового излучения Вселенной. Они уже частично внедрены и используются в работах по программе «Генетический код Вселенной».

Апробация результатов

Результаты работы обсуждались автором диссертации на 11 научных конференциях и симпозиумах в России и за рубежом:

1. XXII конференция «Актуальные проблемы внегалактической астрономии», Пущино, 6-18 июля 2005.
2. Международная конференция «The XXXV Young European Radio Astronomer's Conference», Кальяри, Италия (2005).
3. XXIII-конференция «Актуальные проблемы внегалактической астрономии». Пущино, 25-27 апреля 2006г.
4. Международная конференция «The XXXVI Young European Radio Astronomer's Conference», Голландия, 12-15 сентября 2006г.
5. IX Russian-Finnish Symposium on Radio Astronomy «Multi-Wavelength Investigations of Solar and Stellar Activity and Active Galactic Nuclei», October 15-20, 2006.
6. Международная конференция «Сахаровские осцилляции и радиоастрономия», CAO РАН, 15-19 октября 2007 г.
7. Международная конференции «Физика Космоса». 27-31 мая 2007г.
8. Международная конференция «The XXXVII Young European Radio Astronomer's Conference», Франция, 4-7 сентября 2007г.
9. Всероссийская Астрономическая конференция ВАК-2007.
10. The X Finnish-Russian Radio Astronomy Symposium «Multi-Wavelength Investigations of Solar and Stellar Activity and Active Galactic Nuclei». Finland, 1-5 september, 2008.
11. Радиоастрономическая конференция «Повышение эффективности и модернизация радиотелескопов России». CAO РАН, 22-27 сентября 2008г., программа и тезисы.

Список публикаций по теме диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих 13 работах, из которых 5 статей опубликованы в двух научных журналах из списка изданий, рекомендованных ВАК и 8 работ в материалах Всероссийских и международных конференций.

1. Бурсов Н.Н., Парийский Ю.Н., Майорова Е.К., Мингалиев М.Г., Берлин А.Б., Нижельский Н.А., Глушкова И.А., Семенова Т.А. Околозенитный обзор неба на РАТАН-600. Каталог радиоисточников. *Астрономический журнал*, т.84, №3, с.227-244 (2007).
2. Семенова Т.А., Бурсов Н.Н., Парийский Ю.Н. Радиоспектры объектов RZF-каталога РАТАН-600 и популяционный анализ слабых радиоисточников. *Астрономический журнал*, т.84, №4, с.291-297 (2007).
3. Семенова Т.А., Парийский Ю. Н., Бурсов Н.Н. Об «Х-компоненте» в фоновом излучении радио-неба. *Астрономический журнал*, т.86, №1, с.3-11 (2009).
4. Семенова Т.А., Парийский Ю.Н., Цыбулев П.Г. О требованиях к методам «просветления» атмосферы при наземных радиоастрономических наблюдениях фоновых радиоизлучений Вселенной. *Астрофизический бюллетень*, т.64, №2, с.111-118 (2009).
5. Семенова Т.А., Бурсов Н.Н., Парийский Ю.Н. Синхротронное излучение Галактики по данным RZF-обзора на РАТАН-600. *Астрофизический бюллетень*, т. 64, №3, с.213-219 (2009).
6. Bursov N.N., Majorova E.K., Semenova T.A., Mingaliev M.G., Berlin A.B., Nizhel'skij N.A., Tsibulev P.G. RZF Survey. - IX Russian-Finnish Symposium on Radio Astronomy Multi-Wavelength Investigations of Solar and Stellar Activity and Active Galactic Nuclei. Program and abstracts, p. 14. (2006).
7. Семенова Т.А., Парийский Ю.Н., Бурсов Н.Н. «Spinning dust» и другие фоновые излучения неба по данным РАТАН-600. Труды Всероссийской Астрономической конференции ВАК-2007, с.389 (2007).
8. Tamara Semenova. Between NVSS and IRAS: search for a new population of sky objects at RATAN-600. XXXVII Young European Radio Astronomers Conference, 4-7 September, Bordeaux, France. Program and Abstract Book, p.30 (2007).
9. Парийский Ю.Н., Бурсов Н.Н., Соболева Н.С., Темирова А.В., Семенова Т.А., Майорова Е.К., Нижельский Н.А., Берлин А.Б. Поиск новых популяций фоновых радиоисточников на сантиметровых волнах. - Тезисы докладов международной конференции «Сахаровские осцилляции и радиоастрономия», 15-19 октября, САО РАН. Программа и тезисы докладов, с.11. (2007).
10. Семенова Т.А., Парийский Ю.Н. «О фоновых излучениях неба в сантиметровом диапазоне длин волн» Тезисы докладов международной конференции «Сахаровские осцилляции и радиоастрономия», САО РАН. Программа и тезисы докладов, с.14 (2007).
11. Семенова Т.А. Between NVSS and IRAS: Search for New Population of the Sky Objects at RATAN-600. Тезисы докладов международной конференции «Физика Космоса», (2007).
12. Semenova T.A., Parijskij Yu.N., Bursov N.N. «Radio Spectra of the RATAN-600 RZF objects and population analysis of weak radio sources». Program and abstract. The X Finnish-Russian Radio Astronomy Symposium. Finland,

1-5 september, p.22 (2008).

13. Семенова Т.А., Парийский Ю.Н., Цыбулев П.Г., Веледина А., Бурсов Н.Н. «Атмосферные ограничения для наземных радиотелескопов: опыт РАТАН-600». Радиоастрономическая конференция «Повышение эффективности и модернизация радиотелескопов России». САО РАН, программа и тезисы, с.72 (2008).

Личный вклад автора диссертации

Все 13 работ выполнены в соавторстве:

1. В работах [1, 10] - участие в обработке данных околозенитного обзора на РАТАН-600.
2. В работах [2, 7, 9, 11-13] – участие в обработке наблюдательных данных. Анализ полученных радиоспектров, отождествлений и популяционный анализ объектов выполнены автором.
3. В работах [3, 8] – участие в подготовке, проведении наблюдений и обработке данных.
4. В работе [4] – участие в подготовке и сопровождении наблюдений. Обработка измерений проведена автором с использованием программы, разработанной П.Г. Цыбулевым.
5. В работе [5, 6] – участие в обработке и анализе данных.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из Введения, 5 глав, Заключения, списка цитируемой литературы и двух Приложений. Полный объем диссертации составляет 146 страниц, в том числе 39 рисунков, 4 таблиц, два Приложения на 42 страницах и Список литературы содержит 109 наименования на 6 страницах.

Краткое содержание работы

Во **Введении** дается общая характеристика работы и ее актуальность.

В **первой главе** выполнен краткий обзор литературы с основными результатами, полученными в этой области ведущими группами в астрономии. Проводится сравнительный анализ результатов.

Во **второй главе** приведены результаты по статистике атмосферного шума, полученные по наблюдательным данным околозенитного обзора, в котором уже накоплены сотни суточных многочастотных сканов. Предложены методы селекции и чистки атмосферного шума. Проведена оценка вклада атмосферного шума в фоновое излучение радионеба.

Атмосферный шум доминирует над гауссовым шумом радиометров при наземных исследованиях достаточно протяженных объектов на коротких волнах. РАТАН-600 имеет ряд преимуществ, связанных с его большим линейным размером. Тропосферный шум связан с вариациями поглощения, прежде всего, в водяном паре (вблизи линии 1.35см). На РАТАН-600 использована теория фильтрации атмосферных шумов большой апертурой радиотелескопа [Есепкина Н.А. и др.,1973]. «Фильтрация апертурой» значительно снижает атмосферный шум. Но чем выше чувствительность радиометров, тем сильнее роль атмосферного шума. Проблема учета атмосферного шума неба при наземных наблюдениях является особенно

острой при исследовании флуктуаций реликтового фона, где исследуются угловые масштабы около градуса. Время прохождения таких масштабов через диаграмму РАТАН-600, как правило, больше времени $t=D/v$ (где D – размер апертуры, v – скорость ветра), и «апертурная фильтрация» становится менее эффективной. Таким образом, многочастотная фильтрация атмосферной компоненты шума оказывается не очень эффективной при малом атмосферном шуме.

В данной главе предлагается несколько методов чистки и селекции данных, включая применение вейвлет-анализа. Эффективность этих методов демонстрируется на примере новых наблюдательных данных околозенитного обзора – на высоте источника 3C84: $0^h \leq \alpha < 24^h$, $\delta = 41^{\circ}30' \pm 1^{\circ}$.

Вейвлет-анализ позволяет выделять аномальный шум атмосферы по заданному уровню, что дает возможность удалить зашумленные области.

По результатам обработки данных, проведенных на РАТАН-600 с 6.11.2006 по 28.03.2007 (по 1700 сканов на волнах 1см, 1.38см, 2.7см, 3.9см, 6.2см по всем сечениям) в рамках программы «Генетический код Вселенной» показана эффективность предварительной селекции данных с малым атмосферным шумом на интересующих наблюдателя временных масштабах. Среднее положение излома спектра мощности равен 0.1 Гц, на волнах длиннее и короче 1.38см излом смещен в сторону низких частот ~ 0.03 Гц.

Удаление 30% плохих данных при использовании вейвлет-анализа привело к снижению мощности атмосферного шума более чем на порядок. При исключении записей по уровню 3σ (6%) увеличено отношение S/N в 1,7 раза, а при 2σ (12%) – 2.3 раза. При медианной чистке (удаление 50%) средний выигрыш в отношении S/N получен около 6. Многочастотную фильтрацию рекомендуется использовать для устранения атмосферного шума в исследованиях на более длинных волнах (> 1.38 см) фонового излучения Галактики при плохих атмосферных условиях. Все рассмотренные методы чистки и селекции данных показали эффективность при исследовании реликтового излучения, в зависимости от атмосферных условий.

Для пространственных масштабов $l > 1000$ это утверждение сделано с учетом реальных свойств атмосферного шума на РАТАН-600. Для $l < 1000$ уже освоенные простые методы селекции данных и предложенные здесь методы чистки атмосферного шума должны быть достаточными для достижения чувствительности выше достигнутой в эксперименте WMAP на всех угловых масштабах «Сахаровских осцилляций».

Пробные наблюдения на матричном радиометрическом комплексе МАРС-3 также показали эффективность глубокой чистки поляризационных данных от проникновения атмосферного шума из-за неравенства свойств каналов с ортогональными модами с помощью неполяризованного низкочастотного атмосферного шума. С другой стороны, следует иметь ввиду, что матричный радиометрический комплекс из любого числа элементов чувствует атмосферный шум так же, как и один ее элемент. Если шум радиометров независим, то атмосферный шум оказывается когерентным

и не усредняется. Для его уменьшения необходимы только многосуточные наблюдения.

При, не слишком малых пространственных масштабах l , можно использовать дифференциальный метод широкого сканирования. Ограничением на пространственные масштабы l будут размеры вторичного зеркала ($l > F/L$, где L - размер фокальной линии вторичного зеркала, F - фокусное расстояние), так как вся атмосфера расположена в ближней зоне и поэтому не подвержена абберациям. Для чистки первого максимума «Сахаровских осцилляций» ($l=220$) необходим дополнительный радиометр на расстоянии 1-2 метров от основного матричного комплекса МАРС-3.

Третья глава посвящена результатам обработки, облака в области созвездия Персея [Watson R.A., et al., 2005] (известного как пылевое) на наличие дипольного излучения макромолекул. Считается, что этот шум поляризован и внесет большой вклад в поляризационные исследования реликтового фона в будущих экспериментах. С помощью многочастотных исследований на РАТАН-600 получена оценка реальности дипольного излучения макромолекул. Также в данной главе проведена проверка гипотезы о роли скоплений компактных НП областей.

Исследования в наиболее изученном молекулярном облаке в созвездии Персея показали признаки аномального протяженного излучения и не выявили сильных радиоисточников (компактных НП областей), которые могли бы имитировать аномальный спектр радиоизлучения в этой области.

Отсутствие мощных локальных источников малого углового размера не подтверждает скопления ультра-компактных НП областей и объектов с максимумом спектра на сантиметровых длинах волн.

На длине волны 1 см достаточно уверенно обнаружена деталь существенно меньшего размера, чем масштаб всего комплекса, и совпадающая с самой яркой частью изображения этого комплекса на 100 микронах. Плотность потока от этой детали сопоставима с интегральной плотностью потока на той же длине волны по данным эксперимента WMAP, но много больше, чем плотность потока, зарегистрированная недавно с помощью VSA, интерферометрической системой с синтезированным разрешением около 7 мин. дуги.

По нашим результатам получено, что процент поляризации пылевого облака в области созвездия Персея мал, и дипольное излучение макромолекул имеет малое влияние на исследования поляризации реликтового фона Вселенной.

Ниже приведены аргументы в пользу этого утверждения.

1. Даже для этого объекта есть сомнения в необходимости привлечения «дипольного излучения макромолекул». Приняв новый механизм для облака в области созвездия Персея, где число водородных атомов по лучу зрения достигает $2 \cdot 10^{22}$ атомов/см², на высоких же Галактических широтах их число опускается до $2 \cdot 10^{18}$ атомов/см². Учитывая данные о средней яркостной температуре в направлении облака в созвездии Персея, низкий процент поляризации в этом облаке, измеренный на РАТАН-600 (~1-2%), яркостная

температура в поляризованном излучении вне направления на такие облака будет много меньше 1 микро-К. Такие облака на высоких широтах крайне редки.

2. Ионизированные пылинки должны быть привязаны к силовым линиям галактического магнитного поля и поляризация от них должна иметь как скалярную, так и вихревую компоненты в равной степени, подобно поляризации синхротронного излучения. Первые сведения о поляризации фонового излучения неба противоречат этому и верхний предел на вихревую компоненту магнитного поля Галактики (В-компонента) ограничивает не только роль поляризованного синхротронного шума Галактики, но и роль дипольного излучения макромолекул в известных интерпретациях [Tegmark M., et al. 1999; Watson R.A., 2005; 2006].

Четвертая глава посвящена оценке роли синхротронного излучения по данным РАТАН-600 в изучение реликтового фона.

Глубокие обзоры околозенитной области неба ($0^\circ < \text{RA} < 24^\circ$, $\text{Dec} = \pm 1^\circ$ град.) в диапазоне длин волн 1-49 см на РАТАН-600 позволили уточнить спектральный индекс синхротронного фонового излучения Галактики на волнах 7.6-49 см. Новые наблюдения на РАТАН-600 показали, что возможны глубокие исследования интенсивности и поляризации реликтового фона (скалярная компонента магнитного поля E) в наземных экспериментах в коротком сантиметровом диапазоне волн. Синхротронное излучение Галактики также может ограничить космические и наземные исследования поляризации фонового излучения, возникающей при рассеянии на реликтовых гравитационных волнах (компонента В). Предполагается, что исследованная на РАТАН-600 область будет использована при интерпретации данных эксперимента Planck для более детального учета роли синхротронного излучения Галактики.

В сантиметровом диапазоне длин волн синхротронный шум Галактики не препятствует детальному исследованию поляризации Сахаровских осцилляций (мода E, $l=1000$). Однако, изучение моды В, связанной с рассеянием фотонов на реликтовых гравитационных волнах ($l=80$), следует проводить на более коротких волнах. Это связано с турбулентным спектром флуктуаций всех фоновых излучений Галактики, что приводит к росту их интенсивности с увеличением угловых масштабов. При разложении шумов неба по полиномам Лежандра [«Bluebook»], $C_l \sim l^{-3}$ и шум Галактики на $l=80$ может быть в 1000 раз больше, чем на $l=1000$.

Анализ многолетних данных обзоров неба на РАТАН-600 позволяет сравнить предсказанные в 1998 г. оценки возможных шумов Галактики на разных частотах и на разных масштабах с реальными данными, полученными в околозенитном обзоре.

По результатам обработки 400 суточных сканов для 7.6, 13, 31, 49 см получен полный разрез неба на склонении источника 3С84.

По этим данным получено, что среднее значение среднеквадратичного отклонения отсчетов для шума в полосе околозенитного обзора на волне наблюдения 7.6 см равно $dT = 51 \mu\text{K} \pm 3.3 \mu\text{K}$, что близко к оптимистическим

вариантам оценок синхротронного излучения М. Тегмарка [Tegmark M., et al., 1999] при изучении реликтового фона.

Вариации спектрального индекса нетеплового радиоизлучения Галактики в исследованной полосе обзора неба получена по данным РАТАН-600 на волне 7.6 см и данным Хаслама на волне 74 см [Haslam C.G.T., et al., 1981; 1982]. Средний спектральный индекс по яркостной температуре близок к 3 с точностью около 10%. Двухчастотный спектральный индекс фонового излучения в околозенитном обзоре не является постоянным, а испытывает пространственные вариации даже на высоких галактических широтах.

Уточнение спектра синхротронного излучения по данным РАТАН-600 позволяет пересмотреть его роль на всех частотах, считая, что спектральный индекс синхротронного излучения не зависит от частоты. На малых масштабах ($l=2000$), шум синхротронного излучения менее 1 микро-К на частотах от 15 до 700 ГГц. Учитывая «окно прозрачности» атмосферы Земли [Парийский Ю.Н., 1998], можно достичь этого предела не только в космосе, но и с Земли. Такая возможность в настоящее время реализуется в проекте «Генетический код Вселенной».

Полученный двухчастотный спектр позволяет уточнить вклад синхротронного излучения на волнах экспериментов WMAP и Planck. По данным РАТАН-600 расширено частотное «окно» [Бурсов Н.Н., 2004], в котором синхротронное излучение не будет препятствовать наблюдениям реликтового фона. Это позволяет проводить глубокие наземные эксперименты по анизотропии реликтового фона.

Пятая глава посвящена оценке роли излучения дискретных источников в исследованиях реликтового фона. Подобные оценки проводились многими авторами, в том числе в недавней работе [Huffenberger K.M., et al., 2006].

В данной главе также приведены результаты обработки наблюдательных данных РАТАН-600 в сантиметровом диапазоне волн нескольких сот объектов NVSS-каталога с существенно разными плотностями потоков. Приведены оценки изменений распределения по спектральным индексам для исследуемой выборки объектов. В результате исследований объектов RZF-каталога получено, что доля объектов с инверсионными спектрами составляет около 1% при $\alpha > 1$ и 5% объектов при $\alpha > 0$ ($S \sim \nu^{-\alpha}$). Это – небольшая доля и соответствующие области неба можно экранировать от источников при изучении реликтового фона.

Показано, что при переходе от «сильных» радиоисточников к «слабым» наблюдается уменьшение числа SS и USS объектов и замытие обнаруженного еще в 70-х годах минимума в числе объектов между «крутыми» и «плоскими» спектрами [Fonaroff B.L., et al., 1973]. Сравнение с теоретическими моделями эволюции радиоисточников позволяет заключить, что эффект уменьшения числа SS и USS объектов при переходе от «сильных» радиоисточников к «слабым» находит естественное объяснение в связи с резким падением процента классических радиогалактик типа FR II [Jarvis M.J., et al., 2004]. Эффект замытия минимума, возможно, связан с ростом доли популяции источников со спектральными индексами $-0.7 \div -0.5$.

Модельные эволюционные оценки в разные годы давали различные результаты. Данные по отождествлению источников RZF-каталога близки к оценкам, полученным в последние годы, которые предсказывают сильное падение вклада мощных радиогалактик на плотностях потока близких к RZF-каталогу [Bennet C.L., et al., 2003; Jarvis M., et al., 2004]. Этот результат подтверждается и морфологическими данными по околозенитной области неба, где имеются данные по каталогу FIRST. Однако, как показывает анализ цветов родительских галактик по многоцветным данным SDSS, это не говорит о полном их исчезновении и, даже в относительно небольшой области неба околозенитного обзора, может быть несколько объектов с красным смещением $Z > 4$. Экстраполируя на все небо, их число должно быть близким к 100000. Объекты с плотностью потока 10 мЯн на таких красных смещениях заведомо являются радиоисточниками высокой светимости, и их число отражает обилие сверхмассивных черных дыр в ранней Вселенной. Пример такого объекта с массой черной дыры 10^9 солнечных масс на красном смещении $z = 4.515$ недавно обнаружен в предыдущем глубоком обзоре на РАТАН-600 по программе «Большое Трио» [Копылов А.И., и др., 2006]. Как известно из модельных экспериментов, наличие значительного числа родительских галактик с признаками взаимодействия с соседями («merging») упрощает проблему раннего формирования сверхмассивных черных дыр.

Проведено оптическое отождествление объектов RZF-каталога с объектами каталога SDSS. Обработка результатов показала, что 75% объектов RZF-каталога отождествляется с SDSS объектами.

Многоцветная фотометрия по данным SDSS показала, что 20% родительских галактик слабее $r=22.5m$ и могут иметь большие красные смещения.

В результате проделанной работы по поиску следов «break-galaxies» с обрывом оптического свечения за пределом $912\text{\AA}$ по SDSS фильтрам $u3540\text{\AA}$, $g4925\text{\AA}$, $r6335\text{\AA}$, $i7800\text{\AA}$, $z9294\text{\AA}$ получен список кандидатов в далекие объекты.

В заключении представлены основные результаты диссертации.

В приложении 1 представлена таблица полученных в результате отождествлений параметров. Результаты отождествления RZF-каталога РАТАН-600, каталога Sloan Digital Sky Survey («SDSS-каталог») и «FIRST-каталога» представлены в **приложении 2**.

Цитируемая литература

1. Bennet C.L., Bay M., Halpern M., Hinshaw G., Jackson C., Jarosik N., Kogut A., Limon M., Meyer S.S., Page L., Spergel D.N., Tucker G.S., Wilkinson D.T., Wollack E., Wright E.L. ApJ. 583, 1 (2003).
2. Douglas P., Finkbeiner D.F., and Schlegel D.J. e-Print arXiv:astro-ph/0109534v1 (2001).
3. Douglas P., Finkbeiner D.F., Langston G.I., and Minter A.H. e-Print arXiv:astro-ph/0408292v1 (2004).

4. Draine B.T. & Lazarian A. e-Print arXiv: astro-ph/9802239v1 (1998).
5. Fonaroff B.L., Longair M.S. MNRAS, 161 (1973).
6. Haslam C. G. T., Klein U., Salter C. J., et al., A&A 100, 209 (1981).
7. Haslam C. G. T., C. J. Salter, H. Stoffel and W. E. Wilson A&AS 47, 1 (1982).
8. Huffleberger K.M., Eriksen H.K., Hansen F.K., astro-ph/0606538v2, (2006)
9. Jarvis M.J., Rawlings S. Astro-ph/0409097 (1997).
10. Penzias A., Wilson R.W. ApJ. V142. P.491 (1965).
11. Parijski Yu.N. Ap.J. Lett, v.188, L47 (1973).
12. de Oliveira-Costa A., Tegmark M., Douglas P., et al., e-Print arXiv:astro-ph/0010527 (2001).
13. Tegmark M., Eisenstein D.J., Hu W. and de Oliveira-Costa A., arXiv: astro-ph/9905257v2 (1999).
14. Watson R.A., Rebolo R., Rubino-Martin J.A., et al., Astrophys. J. 624, L.89 (2005).
15. Watson R.A., Rebolo R., Davis R.D. et al. in: Proceedings of Science: CMB and Physics of the Early Universe www.pos.sisa.it/archive/conferences/027/066/CMB2006_066.pdf (2006).
16. Бурсов Н.Н., Диссертация на соискание степени кандидата физ-мат. наук (САО, п.Нижний Архыз, 2004).
17. Есепкина Н.А., Корольков Д.В., Парийский Ю.Н. Радиотелескопы и радиометры. «Наука», 416с (1973).
18. Копылов А.И., Госс В.М., Парийский Ю.Н. и др. Письма в АЖ., т.32, №7 (2006).
19. Мингалиев М.Г., Сотникова Ю.В., Бурсов Н.Н., Кардашев Н.С., Ларионов М.Г. Астрономический журнал, т.84, №5 (2007).
20. Насельский П.Д., Новиков Д.И., Новиков И.Д. Москва «Наука», 390с. (2003).
21. Парийский Ю.Н., Пятунина Т.Б., Астрономический журнал, т.47, 1337 (1970).
22. Парийский Ю.Н., Петров З.Е., Чернов Л.Н., Письма в А.Ж., т.3, 483 (1977).
23. Парийский Ю.Н., Корольков Д.В., «Итоги Науки и Техники», серия Астрономия, Москва, т. 31 (1986).
24. Парийский Ю.Н. Проект «Генетический код Вселенной» (1998).
25. «Bluebook», <http://www.rssd.esa.int/index.php?project=planck>,
<http://lambda.gsfc.nasa.gov>,

Бесплатно

Отпечатано в типографии
Специальной астрофизической обсерватории РАН
369167 пос. Нижний Архыз, Карачаево-Черкесская республика, Россия
Заказ № Уч.-изд. Тираж 100 экз.