

УДК 524.6-77

## СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ГАЛАКТИКИ ПО ДАННЫМ RZF-ОБЗОРА НА РАТАН-600

© 2009 Т. А. Семенова, Н. Н. Бурсов, Ю. Н. Парийский

*Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 369167 Россия*

Поступила в редакцию 20 апреля 2009 г.; принята в печать 10 июня 2009 г.

Глубокие обзоры околоразенитной области неба в диапазоне 1–49 см РАТАН-600 позволили уточнить спектральный индекс синхротронного фонового излучения Галактики на волнах 7.6–49 см. Полученные данные противоречат модели синхротронного излучения, принятой при интерпретации первого года данных эксперимента WMAP, которая привела к гипотезе ранней вторичной ионизации Вселенной на красных смещениях  $Z > 10 - 30$ . Новые наблюдения на РАТАН-600 показали, что возможны глубокие исследования интенсивности и поляризации реликтового фона (компоненты 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 B). Предполагается, что исследованная на РАТАН-600 область будет использована при интерпретации данных эксперимента PLANCK для более детального учета роли синхротронного излучения Галактики.

Ключевые слова: *радиоисточники*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени на РАТАН-600 накоплен большой массив многочастотных данных по анизотропии фона Галактики в сантиметровом и дециметровом диапазонах длин волн с чувствительностью несколько мК и с разрешением менее  $1'$ . Это позволяет значительно уменьшить погрешности экстраполяции по частоте и по угловым масштабам мировых данных дециметрового диапазона, которыми пользуются космологи [1–5].

Считалось, что среди фоновых излучений Галактики наибольший вклад в реликтовый фон вносит синхротронное излучение как в интенсивности, так и в поляризации [6, 7]. Все данные последних лет на РАТАН-600 накапливаются в околоразенитной области ( $0^h < R.A < 24^h$ ,  $40.5^\circ < \delta < 42.5^\circ$ ).

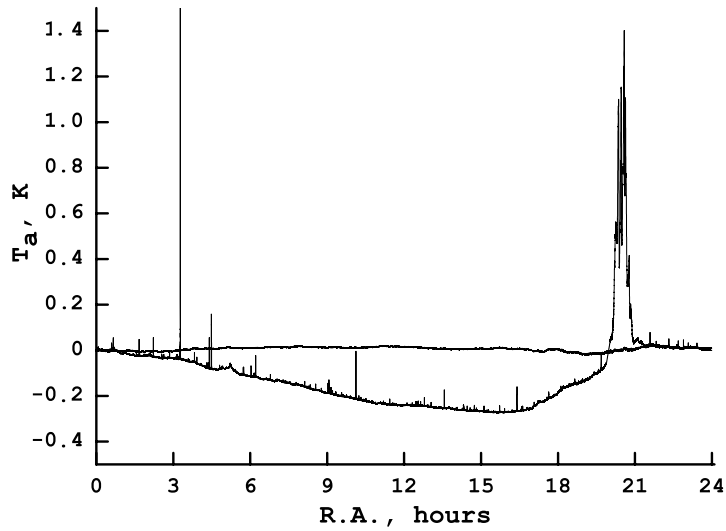
Роль фоновых дискретных источников синхротронного и теплового излучения газа и пыли в Галактике, применительно к инструментам с высоким разрешением, рассмотрена в работах [8–12]. Сопоставление с новыми дециметровыми наблюдениями поляризации Галактики (WMAP) показало, что экстраполяция дециметровых высокоширотных данных на короткие волны и на малые масштабы поляризационного шума, связанного с синхротронным излучением, пока затруднительна. Необходимы прямые оценки, более близкие по частотам и масштабам к основным экспериментам по поляризационной структуре реликтового фона.

С учетом всех данных, уточненных в последние годы по фоновым излучениям Галактики, можно надеяться, что в Галактике существует “окно прозрачности” с зависимостью “масштаб–частота”, где глубина внеатмосферных исследований зависит только от чувствительности приемной аппаратуры. Это позволит уточнить возможности наземных наблюдений анизотропии реликтового фона на угловых масштабах, недоступных пока с космических аппаратов.

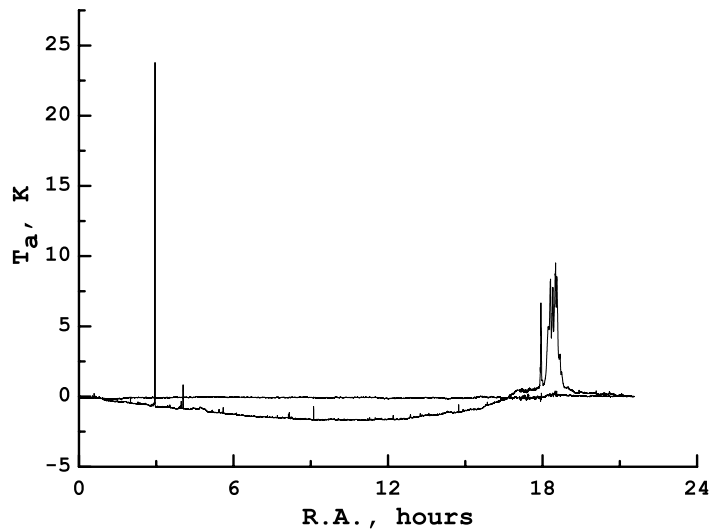
### 2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ РАТАН-600

По накопленным данным зенитного обзора на РАТАН-600 за несколько лет наблюдений получены оценки синхротронного излучения на всех длинах волн, доступных РАТАН-600. Обработка проводилась методом накопления данных в двух независимых выборках на каждой длине волны, из которых впоследствии формировались полусумма и полуразность между выборками. Полусумма содержит сигнал от неба, шумы радиометра и атмосферы, в полуразности только шум радиометра и атмосферы, что позволяет выделить сигнал от неба в данных наблюдений.

В дециметровом диапазоне доля пригодных к обработке записей на волнах 13 см и 31 см составляет (60–80)%, а для волны 7.6 см порядка 90%. На Рис. 1–3 представлены полусуммы и



**Рис. 1.** Полный разрез неба без фильтрации низкочастотного шума (вычтен нулевой уровень) на волне 7.6 см (кривая с источником — полусумма данных по двум независимым циклам наблюдений, “прямая” — их полуразность), при накоплении более 300 суточных записей наблюдений.



**Рис. 2.** То же, что на Рис. 1, для длины волны 13 см (усреднено более 400 записей).

полуразности для длин волн 7.6 см, 13 см и 31 см для всей области обзора, где доминирует фоновое синхротронное излучение Галактики.

На Рис. 1 показан результат обработки наблюдений на длине волны 7.6 см, где использовалось несколько сотен 24-часовых сканов RZF-обзора с криорадиометром с чувствительностью

2.5 мК/сек<sup>1/2</sup>. Минимум излучения на кривой приходится на область высоких галактических широт. Из Рис. 1 видно сечение плоскости Галактики в районе 4–6 и 19–21 часов по прямому восхождению. Детали малого масштаба — дискретные источники, попавшие в область обзора.

На Рис. 2 показан тот же разрез неба на длине волны 13 см. Современные оценки роли синхро-

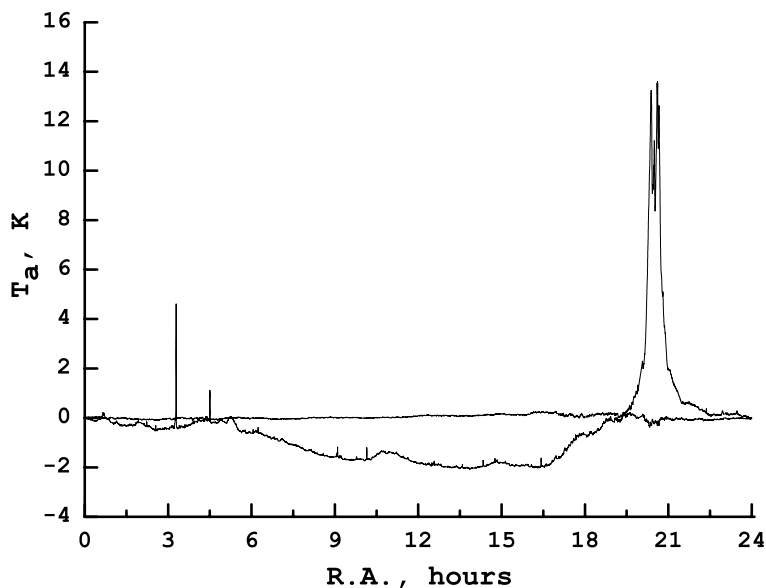


Рис. 3. То же, что на Рис. 1, для длины волны 31 см (усреднено более 400 записей).

тронного излучения Галактики для крупных масштабов приведены в работе [13].

Новая информация, полученная на длине волны 31 см, представлена на Рис. 3.

Достигнутая чувствительность на длинах волн 7.6–49 см (7.6 см — 0.1–0.2 мК, 13 см — 1 мК, 31 см — 2–4 мК, 49 см — 40–50 мК) значительно выше, чем в других обзорах, которые использовались при интерпретации экспериментов по реликтовому фону.

Из данных, представленных на Рис. 1–3 можно получить сведения о спектральном индексе синхротронного излучения на интересующих нас угловых масштабах ( $\theta \sim 1/l$ , где  $l$  — номер мультиполя при разложении фонового излучения по сферическим гармоникам).

Более точные сведения о зависимости спектра синхротронного излучения от координат на небесной сфере в области RZF-обзора позволили уточнить особенности синхротронного фона Галактики на крупных масштабах (на малых мультиполях). Сильная поляризация синхротронного излучения на высоких широтах может привести к коррекции поляризованного излучения на малых мультиполях. Зависимость спектрального индекса синхротронного излучения Галактики от координат на небесной сфере в исследуемой полосе обзора неба показана по данным РАТАН-600 на длине волны 7.6 см и данным Хаслама [1, 2] на Рис. 4. Средний спектральный индекс по яркостной температуре оказался близким к 3 с вариацией около 10%.

Большая поляризация на малых мультиполях, обнаруженная в первых данных WMAP, была интерпретирована как следствие большого числа электронов между нынешней эпохой и эпохой рекомбинации, что требовало пересмотра источников ионизации на больших красных смещениях.

На длине волны 49 см на РАТАН-600 получены высокоточные данные с отношением сигнал/шум более 100 по спектру мощности. Эти данные были использованы для более глубокой оценки роли синхротронного шума Галактики на масштабах “Сахаровских осцилляций”. В качестве примера на Рис. 5 показан шум синхротронного излучения на масштабах, интересных для эксперимента по поиску поляризации “Сахаровских осцилляций”.

Здесь приведены данные около 50 суточных разрезов неба на длине волны 49 см после обработки их алгоритмом “Mexican Hat”, оставляющим только вторую дифференциальную разность шумов на масштабах 40 сек времени (около 10' дуги). Оказалось, что дисперсия шума неба на этих масштабах около 40 мК, что соответствует около 1 мКК на длине волны 1 см (<http://brown.nord.nw.ru/projects.htm>) или менее 30 нК на центральной длине волны эксперимента PLANCK.

В сантиметровом диапазоне длин волн синхротронный шум Галактики не препятствует детальному исследованию поляризации “Сахаровских осцилляций” (мода E,  $l = 1000$ ). Однако изучение

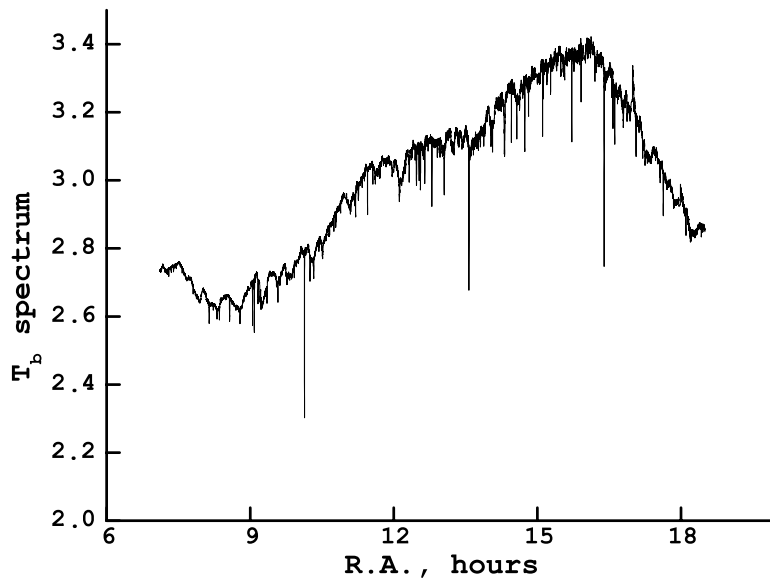


Рис. 4. Для высокоширотной области RZF-обзора показан двухчастотный спектральный индекс, рассчитанный по яркостной температуре в различных точках по данным наблюдений на РАТАН-600 на длине волны 7.6 см и данным Хаслама [1, 2] на длине волны 74 см.

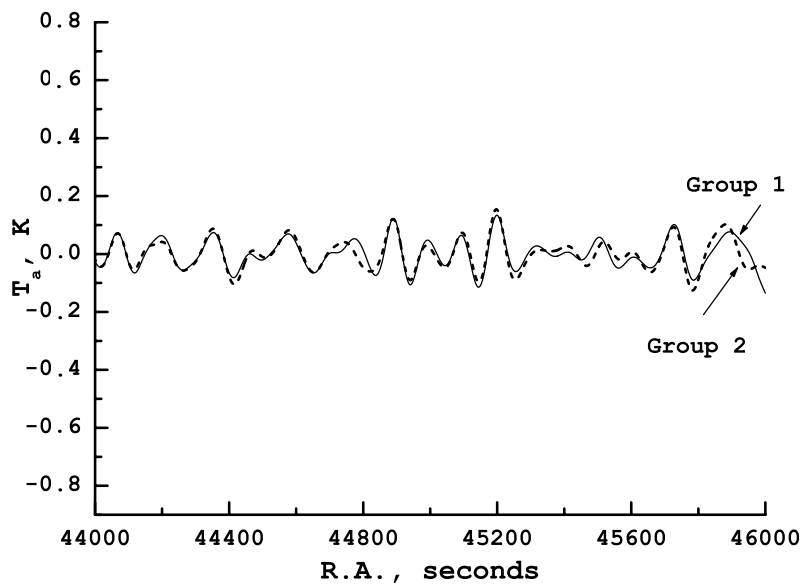
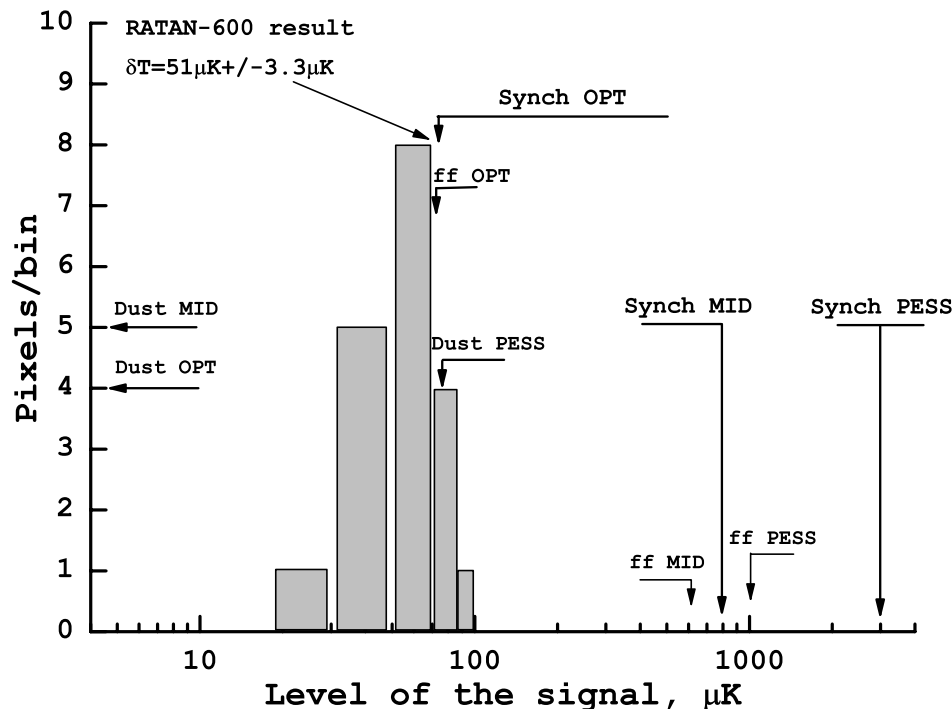


Рис. 5. Шумы неба на длине волны 49 см на масштабах “Сахаровских осцилляций”. Показаны полусуммы двух больших массивов данных на масштабах, соответствующих  $l = 200$ .



**Рис. 6.** Функция распределения отсчетов (СКО) для шума в полосе RZF-обзора. Стрелками обозначены ожидавшиеся в 1998 г. шумы Галактики разной природы (Synch — синхротронное излучение, ff — свободно-свободное излучение, Dust — излучение пыли для трех разных вариантов: оптимистического — OPT, пессимистического — PESS и среднего — MID). Прямоугольниками показана гистограмма распределения амплитуд шумов в полосе RZF-обзора на длине волны 7.6 см для  $l = 2000$ .

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 (при переходе к  $C_l$ -терминологии<sup>1</sup>)  $C_l \sim l^{-3}$  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, полученными в RZF-обзоре. Это показано на Рис.6. На нем представлена функция распределения среднеквадратичного отклонения отсчетов (СКО) для шума в полосе RZF-обзора, полученная на длине волны наблюдения

7.6 см. Показаны предсказания для оптимистического, пессимистического и среднего случаев, представленных в работе М. Тегмарка [10]. По данным РАТАН-600 среднее значение СКО равно  $dT = (51.0 \pm 3.3) \mu\text{K}$ , что близко к оптимистическим предсказаниям для синхротронного и свободно-свободного излучения на малых масштабах, существенных для эксперимента “Генетический Код Вселенной”. Частотный диапазон РАТАН-600 не позволяет проверить предсказания М. Тегмарка для пылевой компоненты. Излучение аномальной пыли (дипольное излучение макромолекул) исследовалось в нашей работе ранее [14].

Уточнение спектра синхротронного излучения по данным РАТАН-600 [15] позволяет пересмотреть его роль на всех частотах, считая, что спектральный индекс синхротронного излучения не зависит от частот, обсуждаемых в экспериментах по анизотропии реликтового фона (см. Рис. 7).

Как видно из Рис.7, на малых масштабах ( $l = 2000$ ) шум синхротронного излучения менее 1 мкК на частотах от 15 до 700 ГГц. Учитывая “окно прозрачности” атмосферы Земли [16], можно

<sup>1</sup><http://lambda.gsfc.nasa.gov>,  
<http://www.rssd.esa.int/index.php?project=planck>

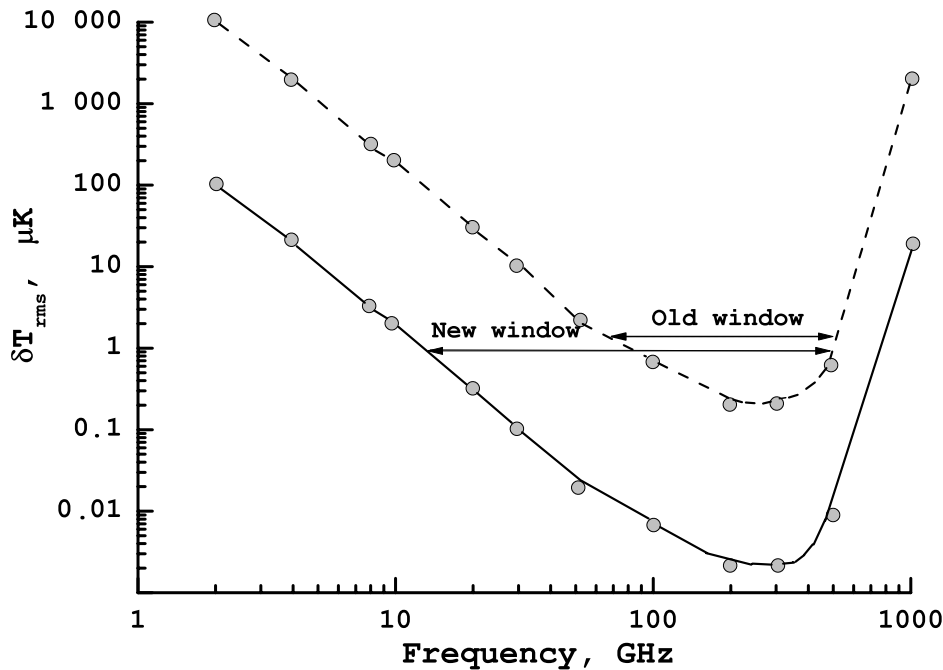


Рис. 7. “Окно прозрачности” Галактического синхротронного фона, полученное по данным РАТАН-600 для  $l = 2000$ . Данные М. Тегмарка [10] — “Old window”, данные РАТАН-600 — “New window”.

достичь этого предела не только в космосе, но и с Земли. Такая возможность в настоящее время реализуется в проекте “Генетический Код Вселенной”.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученный двухчастотный спектр позволяет уточнить вклад синхротронного излучения на длинах волн экспериментов WMAP и PLANCK. По данным РАТАН-600 расширено частотное “окно”, в котором синхротронное излучение не будет препятствовать наблюдениям реликтового фона. Это позволяет проводить глубокие наземные эксперименты по анизотропии реликтового фона.

Вариации спектрального индекса синхротронного излучения в полосе RZF-обзора противоречат модели синхротронного излучения, принятой при интерпретации данных первого года эксперимента WMAP, что привело к ошибочной оценке поляризации реликтового фона на малых мультиполях. В последние годы эта ошибка ими же была устранена.

В коротком сантиметровом диапазоне синхротронный шум Галактики не препятствует детальному исследованию поляризации “Сахаровских осцилляций” (мода E,  $l = 1000$ ).

Анализ синхротронной компоненты излучения Галактики показал, что ее вклад на малых масштабах близок к оптимистическому варианту, предложенному М. Тегмарком.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы статьи выражают благодарность лаборатории радиометров континуума за обеспечение длительных наблюдений на РАТАН-600 с высокой чувствительностью.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента “Поддержка ведущих научных школ”, Российского Фонда Фундаментальных Исследований (08-02-00486) и ОФИ 07-02-12055.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. C. G. T. Haslam, U. Klein, C. J. Salter, et al., *Astronom. and Astrophys.* **100**, 209 (1981).
2. C. G. T. Haslam, C. J. Salter, H. Stoffel, and W. E. Wilson, *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **47**, 1 (1982).
3. P. Reich and W. Reich, *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **63**, 205 (1986).
4. P. Reich, J. C. Testori, and W. Reich, *Astronom. and Astrophys.* **376**, 861 (2001).

5. M. P. Hobson, A. W. Jones, A. N. Lasenby, and F. R. Bouchet, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **300**, 1 (1998).
6. H. K. Eriksen, A. J. Banday, K. M. G'orski, and P. B. Lilje, *Astrophys. J.* **612**, 633 (2004).
7. A. Bonaldi, L. Bedini, E. Salerno, et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **373**, 271 (2006).
8. G. Hinshaw, M. R. Nolta, C. L. Bennett, et al., *Astrophys. J. Supp.* **170**, 288 (2007).
9. R. Leonardi, B. Williams, M. Bersanelli, et al., *New Astronomy Reviews* **50**, 977 (2006).
10. M. Tegmark, D. Eisenstein, W. Hu, A. de Oliveira-Costa, arXiv:astro-ph/9905257.
11. П. Д. Насельский, Д. И. Новиков, И. Д. Новиков, *Реликтовое излучение Вселенной* ("Наука", Москва, 2003).
12. А. В. Чепурнов, Диссертация на соискание степени кандидата физ-мат. наук (САО РАН, Нижний Архыз, 1996).
13. C. Tello, T. Villela, S. Torres, et al., arXiv: astro-ph/0712.3141.
14. Т. А. Семенова, Н. Н. Бурсов и Ю. Н. Парийский, *Астрон. ж.* **84**, 291 (2007).
15. Н. Н. Бурсов, Диссертация на соискание степени кандидата физ-мат. наук (САО РАН, Нижний Архыз, 2004).
16. Т. А. Семенова, Ю. Н. Парийский и П. Г. Цыбулев, *Астрофизический бюллетень* **64**, 111 (2009).

## GALACTIC SYNCHROTRON EMISSION ACCORDING TO THE DATA OF THE RZF SURVEY CONDUCTED AT THE RATAN-600 RADIO TELESCOPE

**T.A. Semenova, N.N. Bursov, Yu.N. Parijskij**

Deep 1–49 cm surveys of the circumzenithal sky area performed using the RATAN-600 radio telescope allowed the spectral index of Galactic synchrotron emission in the 7.6–49 cm wavelength interval to be refined. The data obtained are inconsistent with the model of synchrotron emission adopted to interpret the results of the first year of the WMAP mission, which led to the hypothesis of the early secondary ionization of the Universe at redshifts  $Z > 10 - 30$ . New observations made with the RATAN-600 demonstrated the possibility of deep studies of the intensity and polarization of the microwave background (the E component) in ground-based experiments at short centimeter wavelengths. Galactic synchrotron emission may as well limit the possibilities of space- and ground-based studies of the polarization of cosmic microwave background radiation arising as a result of scattering induced by relic gravitational waves (the B component). The sky area studied with the RATAN-600 is intended to be used to interpret the PLANCK mission data in order to ensure a more detailed account of the role of the Galactic synchrotron emission.

Key words: *radiosources*