

УДК 524.827:520.27

СПЕКТРАЛЬНО-ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ФЛУКТУАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО МИКРОВОЛНОВОГО ФОНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ. НАБЛЮДЕНИЯ НА РАДИОТЕЛЕСКОПЕ РАТАН-600 С ФУРЬЕ-СПЕКТРОАНАЛИЗАТОРОМ

© 2012 А. П. Венгер, И. В. Госачинский*, В. К. Дубрович

Санкт-Петербургский филиал Специальной астрофизической обсерватории РАН,
Санкт-Петербург, 196140 Россия

Поступила в редакцию 25 июля 2011 г.; принята в печать 21 ноября 2011 г.

Методика “околополярного обзора” позволила нам на неподвижной антенне со сравнительно узкой полосой частотного разрешения (600 kHz) и угловым разрешением $45'' \times 7'$ достичь довольно высокой чувствительности по антенной температуре 0.5 mK на длине волны 6 см. Начиная с 2007 г., мы используем Фурье-спектроанализатор с полосой обзора в 10 раз большей, чем в предыдущих наблюдениях, что позволило нам быстро провести повторные проверочные наблюдения, подтвердившие степенной характер и частотную структуру пространственных спектров в двух полосках около полюса Мира в диапазоне угловых периодов $4'–16'$ и показать, что случайно попавшая в нашу полосу обзора галактическая радиолиния молекулы CN (Λ -удвоение вращательного перехода) не имеет отношения к полученным нами спектрам излучения. Оказалось, что угловая структура излучения в двух главных линиях Λ -удвоения (4847.84 и 4870.12 MHz) совершенно различна, а мазерного усиления, которое могло бы этот факт объяснить, в линии CN практически нет. Линия $\text{H } 110\alpha$ (4874.157 MHz), возникающая в разреженном ионизованном галактическом водороде на таких сравнительно высоких галактических широтах, подтверждается этими наблюдениями. Другие детали пространственных спектров также представляются нам вполне реальными, хотя их интерпретация пока совершенно непонятна и требует дополнительных исследований.

Ключевые слова: *радиоконтинуум — космология: реликтовое излучение — методы: наблюдательные: радиоастрономия*

1. ВВЕДЕНИЕ

Проблеме поиска флуктуаций реликтового излучения, имеющих узкие полосы как по частоте, так и по угловой координате, посвящено довольно много теоретических и наблюдательных работ, список которых и обзор предпосылок для постановки такой задачи можно найти в наших предыдущих работах [1–5] и в одном из недавних обширных обзоров этой проблемы Persson и др. [6]. Не вдаваясь в подробности, которые можно найти в указанных работах, мы отметим лишь, что такого рода флуктуации реликтового излучения обычно связывают с излучением первичных молекул H_2 , H_2^+ , HD, HD^+ , H_2D^+ , HeH^+ , LiH, LiH^+ (Persson и др. [6]), а также с формированием первичных структур в газе (протоскоплений или протогалактик) на $z \sim 300–400$ и меньше (до $z \sim 30$).

К сожалению, наши первоначальные попытки обнаружить узкополосные спектрально-

пространственные флуктуации на длине волны 6 см на радиотелескопе РАТАН-600 в 2001–2006 г.г. выполнялись со спектроанализаторами, предназначенными для галактических исследований и имеющими очень узкую полосу обзора. Такого рода наблюдения требовали много времени и не давали полной уверенности в реальности спектрально-пространственных деталей, которые были выявлены в этих наблюдениях. Начиная с 2007 г. мы использовали широкополосный Фурье-спектроанализатор, что позволило нам, во-первых, путем повторных наблюдений убедиться в надежности полученных результатов и, во-вторых, отсеять возможность их объяснения излучением галактических молекул CN, линия излучения которых попала в диапазон поиска.

Эти результаты мы и приведем в данной статье.

2. АППАРАТУРА И МЕТОДИКА

Поиск спектрально-пространственных флуктуаций космического радиоизлучения проводился на

*E-mail: gos@sao.ru

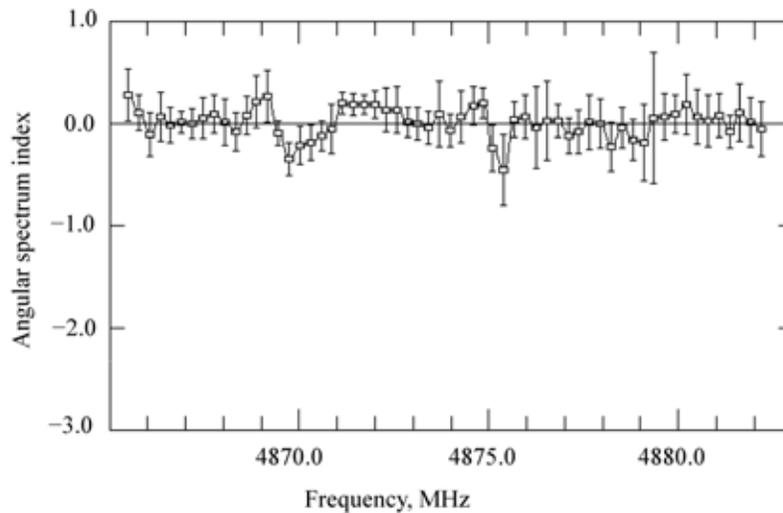


Рис. 1. Зависимость показателя временного (углового) спектра среднего 6 измерений согласованной холодной нагрузки от радиочастоты. На этом и всех последующих рисунках вертикальные черточки изображают величину $\pm\sigma$, т.е. удвоенную среднеквадратичную ошибку вычисления показателя спектра.

Прямые восхождения начала и конца каждой полосы, их средние галактические координаты и полосы частот радиодиапазона

Полоса	РА, часы	l и b , градусы		ΔF , MHz	
				(2007–2008)	(2010)
P1	4–9	123.4	+27.1	4865–4880	4863–4861
P2	15–20	122.7	+27.8	4865–4880	4863–4861

южном секторе радиотелескопа РАТАН-600 [7] на длине волны 6.2 см. Для увеличения времени накопления сигнала при неподвижной антенне наблюдались две полосы неба вблизи полюса Мира на склонении $+89^{\circ}30'$. Ширина диаграммы направленности антенны на высоте $43^{\circ}19'$ составляла $45'' \times 7'$, так что любой точечный источник проходил диаграмму направленности за 343 s, а отсчеты брались не реже, чем через 171 s. По сравнению с объектом, расположенным на небесном экваторе, такой режим давал выигрыш по времени накопления в 114 раз или по чувствительности — в 10.7 раза.

Наблюдения проводились в 2007, 2008 и 2010 г.г. Прямые восхождения начала и конца каждой полосы, их средние галактические координаты и полосы частот радиодиапазона приведены в таблице.

На входе применялся неохлаждаемый усилитель на транзисторах типа НЕМТ [8], шумовая температура системы составляла 70–80 К. Для анализа спектра применялся 2048-канальный Фурье-спектроанализатор с шириной канала 29.3 kHz [9]. Полная полоса обзора спектроанализатора (60 MHz) в первых наблюдениях не ис-

пользовалась из-за недостаточной ширины полосы приемника. Отсчеты спектров сигнала антенны и эквивалента (в качестве последнего использовался пилот-сигнал) интегрировались в течение 60 s и выводились в файл на винчестер для дальнейшей обработки. Продолжительность записи составляла 5 часов, не считая калибровок, так что в каждом канале получалось по 300 независимых отсчетов антенны и эквивалента.

Перевод отсчетов спектров сигнала антенны и эквивалента в единицы антенной температуры осуществлялся по измерениям калибровочного шумового генератора, сигнал которого в свою очередь проверялся по измерениям опорного источника ЗС 147, координаты и поток которого взяты из обзора Gregoгу и др. [10]. Далее из каждого канала радиоспектра вычиталась линейная нулевая линия по времени, которая вычислялась по опорным отсчетам в начале и конце записи, и линейная нулевая линия по радиочастотам, вычислявшаяся по крайним каналам каждого отсчета. После этого спектры сглаживались по частоте скользящим сглаживанием по 586 kHz.

Эффективная площадь антенны на высоте наблюдения оказалась порядка 1000 m^2 .

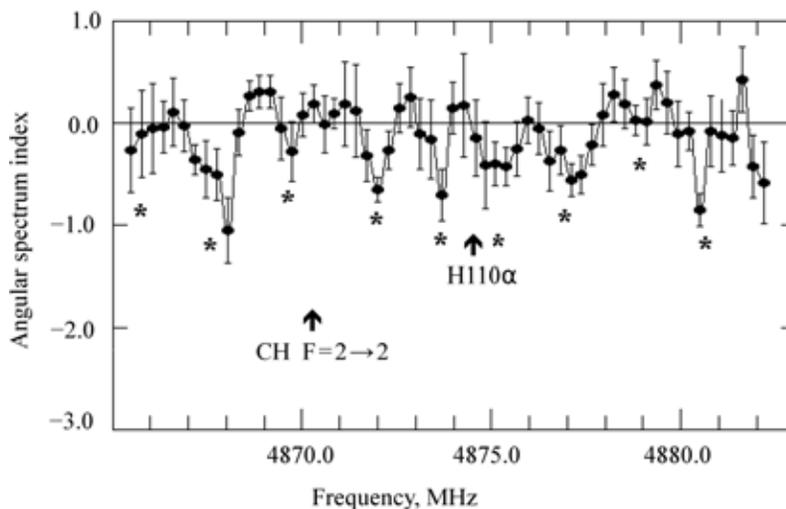


Рис. 2. Зависимость показателя углового спектра от радиочастоты полосы неба P1, вычисленного по среднему 22 наблюдений в октябре 2007 г. Звездочками отмечены детали спектра, которые следует сравнить со следующим рисунком.

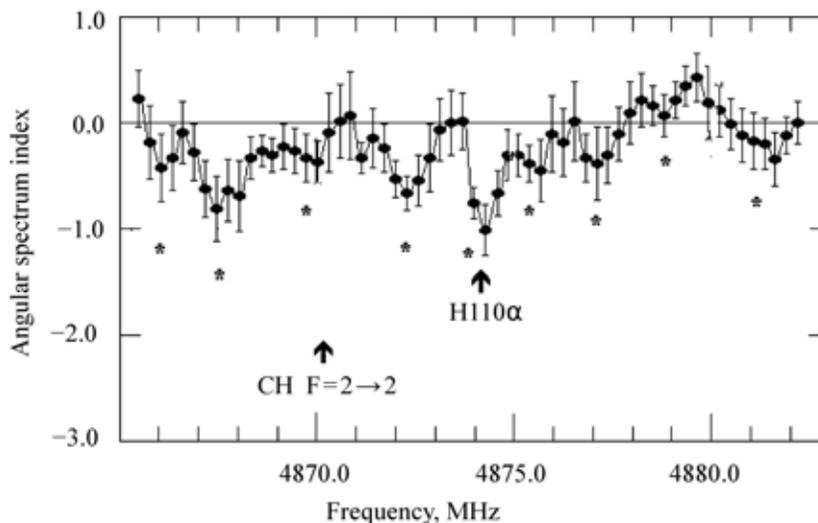


Рис. 3. То же, что и на Рис. 2, вычисленное по среднему 15 наблюдений в октябре–ноябре 2008 г.

Потери в антенне по излучению протяженных объектов, полностью заполняющих диаграмму направленности, для южного сектора нам измерить не удалось, так что мы использовали расчетную величину из работы Майоровой [11], которая дает отношение антенной и яркостной температур $T_A/T_B \approx 0.65 \pm 0.05$.

Из общего количества наблюдений лучшие записи отбиралась визуально по качеству интегрального профиля за время записи. Критерием отбора служило отсутствие помех, паразитного излучения и атмосферных флуктуаций. В результате в каждом цикле было отобрано для осреднения от 8 до 22 наблюдений. Для дальнейшей обработки период дискретизации записей был принят равным

120 с. Для исключения так называемых эффектов “переналожения частот” при вычислении угловых спектров записи в каждом канале были сглажены по прямому восхождению функцией $\sin(\omega t)/(\omega t)$ с периодом 240 с. В результате среднеквадратичное отклонение антенной температуры по оси прямых восхождений на единичной записи составило 10 мК, что оказалось довольно близко к расчетной величине — 7 мК. По оси лучевых скоростей среднеквадратичное отклонение имеет примерно такую же величину. После осреднения отобранных наблюдений и сглаживания их по лучевым скоростям до 600 кГц среднеквадратичное отклонение флуктуаций достигало в лучшем случае 0.5 мК.

Поиск сигнала вызывал определенные трудно-

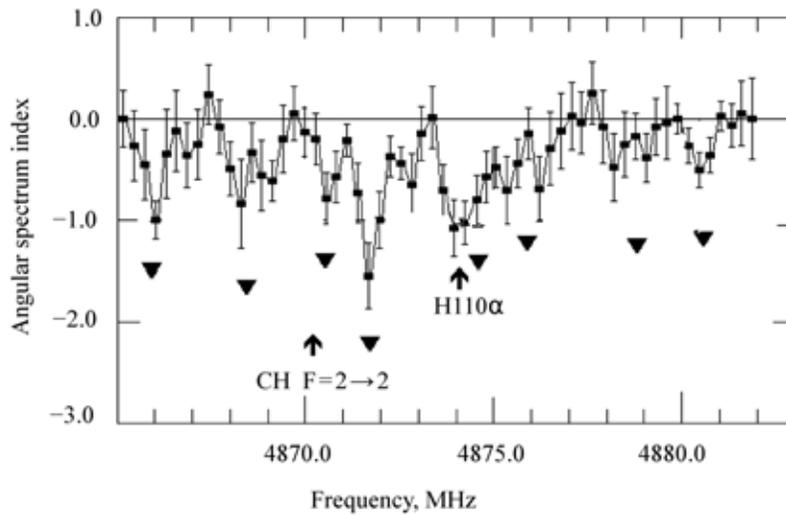


Рис. 4. Зависимость показателя углового спектра от радиочастоты, вычисленная по среднему 22 наблюдений полосы неба P2 в октябре 2007 г. Треугольниками отмечены детали для сравнения со следующим рисунком.

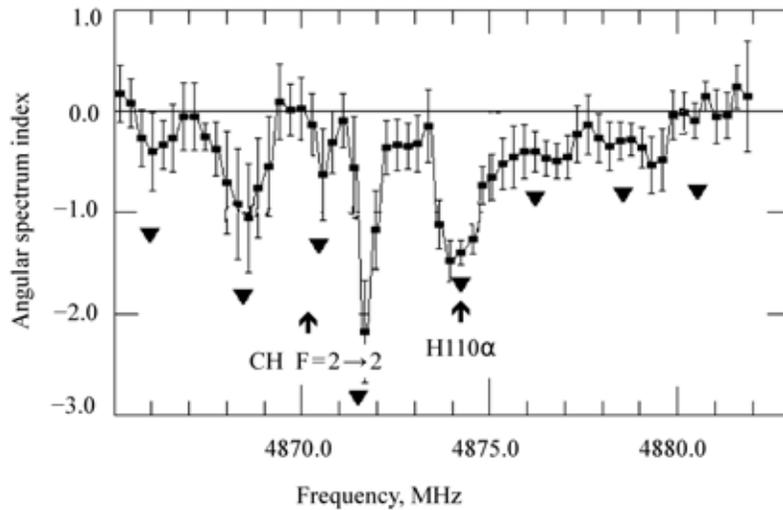


Рис. 5. То же, что и на Рис. 4, вычисленное по среднему 18 наблюдений в октябре–ноябре 2008 г.

сти, поскольку не было известно никаких количественных характеристик излучающей среды (ширина полосы радиочастот, характерный угловой размер излучающих облаков, частота излучения, координаты в пределах полосок). Поэтому в качестве основного признака реальности излучения мы приняли наличие его угловой структуры типа облачной структуры излучения атомов или молекул в межзвездной среде нашей Галактики. Наблюдаемой характеристикой такой структуры мы предположили наличие степенного углового спектра мощности (т.е. квадратов амплитудного спектра), показатель которого отличается от нуля. Длина каждой из полосок вдоль прямого восхождения составляла $35'$, и на этом протяжении с помощью быстрого преобразования Фурье мы вычисляли два

спектра мощности, которые осреднялись между собой, так что наибольший угловой период, который мы идентифицировали, составлял $16'$ (первая гармоника углового спектра), а наименьший (формально, 32-я гармоника) — $0.5'$. Фактически наблюдения показали, что периоды меньше $4'$ замываются флуктуациями угловых спектров, возникающими из-за шумовых флуктуаций наблюдаемого сигнала, а максимальный период также не известен, как и другие характеристики предполагаемого излучения. Вообще, степенной характер углового спектра также не может быть предсказан с уверенностью. Проверка влияния аппаратных ошибок производилась с помощью подключения на вход приемника согласованной нагрузки, охлаждаемой жидким азотом, вместо первичного рупора.

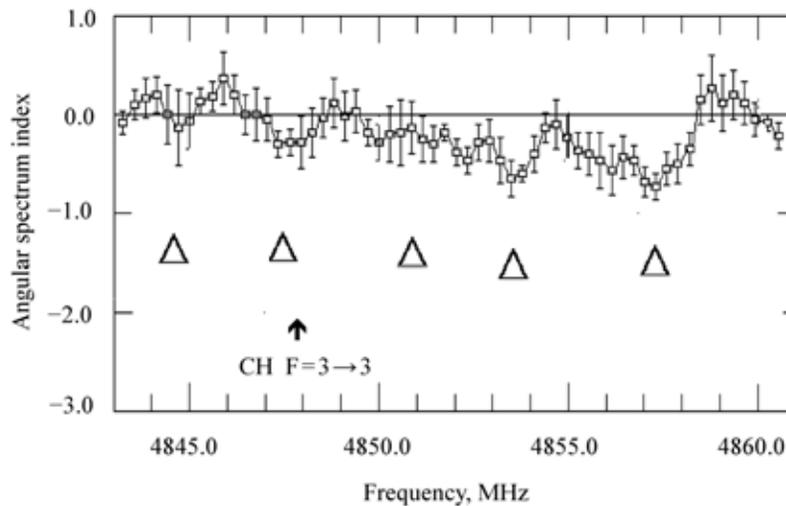


Рис. 6. Зависимость показателя углового спектра от радиочастоты полосы неба P2, вычисленная по среднему 16 наблюдений в мае 2010 г. в полосе радиочастот, где располагается вторая главная линия Λ -удвоения вращательного перехода молекулы CH. Открытыми треугольниками отмечены детали спектра для сравнения со следующим рисунком и с Рис. 4 и 5.

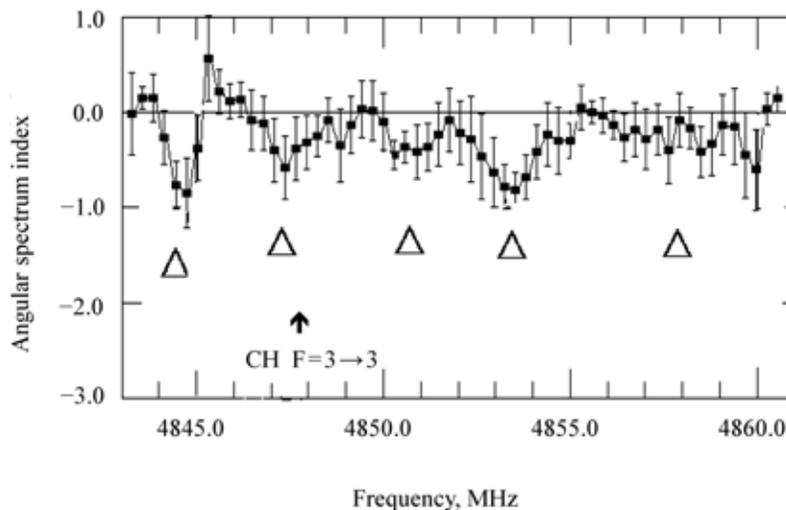


Рис. 7. То же, что и на Рис. 6, вычисленное по среднему 8 наблюдений в октябре 2010 г.

Измерения спектров нагрузки производились в течение 5 часов и обрабатывались, как и наблюдения неба, с антенной. Пример зависимости показателя временного спектра холодной нагрузки от радиочастоты приведен на Рис. 1. Вертикальные черточки соответствуют $\pm\sigma$, где последняя величина представляет среднеквадратичную ошибку вычисления наклона временного спектра. Видно, что наклон временного спектра холодной нагрузки не отличается от нуля с точностью до ошибок измерения, что показывает отсутствие степенного сигнала и каких-либо заметных аппаратных систематических ошибок. При наблюдениях неба временной спектр эквивалентен угловому. В первичных наблюдениях спектроанализатор был настроен на частоту линии

$H110\alpha$ (4874.157 MHz), что было принято совершенно произвольно. Кратковременные помехи и флуктуации коэффициента усиления приемника определялись по профилям пилот-сигнала (эквивалент антенны) и устранялись из профилей антенны при обработке.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Зависимость показателей углового спектра в полосах P1 и P2 от радиочастоты в основном интервале радиочастот 4865–4883 MHz приведены на рисунках 2 и 4 — по наблюдениям 2007 г. и на рисунках 3 и 5 — по данным 2008 г. Настройка приемника, методика наблюдений и обработки в этих

двух циклах были совершенно идентичны. В отличие от спектров холодной нагрузки, спектры, вычисленные по наблюдениям полос неба, имеют разнообразные детали, во-первых, подтверждающие структуру, обнаруженную нами в 2001–2006 г.г. с узкополосными спектроанализаторами [5], и, во-вторых, что самое главное, практически совпадающие в циклах 2007 и 2008 г.г. Отсюда следует, что обнаруженная нами угловая структура в значительной степени реальна. Для удобства сравнения наиболее существенные детали, наблюдаемые в спектрах P1 и P2 отмечены на рисунках одинаковыми значками.

Деталь, соответствующая линии галактического ионизованного водорода H 110 α , подробно описана в нашей предыдущей работе [5]. Кроме нее на рисунках отмечена одна из двух главных линий Λ -удвоения вращательного уровня $J = 5/2$ молекулы CN на частоте 4870.12 МГц (суммарные квантовые числа $F = 2 \rightarrow 2$). Расчеты показывают, что вторая главная линия Λ -удвоения этого мультиплета $F = 3 \rightarrow 3$ на частоте 4847.84 МГц примерно в полтора раза ярче упомянутой выше, а два спутника — в 15 раз слабее. Поэтому, для проверки возможности объяснения угловой структуры излучением линии CN в 2010 г. были проведены два цикла наблюдений полосы P2 в области частот 4843.0–4861.0 МГц, результаты обработки которых приведены на Рис. 6 и 7. Видно, что оба цикла измерений дали примерно одинаковые результаты, но их структура отличается от первой главной линии, изображенной на Рис. 4 и 5. Вообще, такая ситуация возможна и наблюдается, например, у линии излучения галактической молекулы OH на длине волны 18 см, которая также возникает в результате Λ -удвоения вращательного перехода. Однако у этой молекулы имеется мощный мазерный эффект, сильно искажающий распределение молекул по уровням, в то время как у молекулы CN мазерное усиление практически отсутствует. Следовательно, объяснить обнаруженную нами структуру угловых спектров излучением этой молекулы маловероятно.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проверка результатов поиска спектрально-пространственных флуктуаций, проведенного нами в 2001–2006 г.г. на радиотелескопе РАТАН-600 на длине волны 6.2 см и опубликованного в работе [5], привела к положительным результатам. Обнаруженные нами в диапазоне угловых периодов $4'$ – $16'$ флуктуации, приводящие к степенному характеру угловых спектров, явно не являются аппаратным артефактом, а имеют “небесное” происхождение. Оценка их амплитуды

дает величину 1–1.5 мК в полосе 600 kHz с интервалами по частоте порядка нескольких МГц. Вряд ли здесь наблюдается какое-либо влияние земной атмосферы, поскольку любое атмосферное излучение или поглощение в диапазоне 5–10 см имеет непрерывный спектр, и такой сигнал при обработке исключался. Что касается галактического радиоизлучения, то наблюдаемый сигнал не может быть линией молекулы CN, а другие возможные узкополосные компоненты (кроме линии H 110 α) очень слабые. Следовательно, обнаруженное нами излучение является новым и может иметь скорее всего далекое внегалактическое или даже космологическое происхождение. Для более надежной интерпретации выявленных эффектов следует провести дополнительные наблюдения в более широком диапазоне угловых масштабов, на других частотах, а также в других участках неба.

БЛАГОДАРНОСТИ

В заключение авторы считают необходимым выразить благодарность сотрудникам САО РАН В. Г. Романюку, З. А. Алферовой и Т. В. Монастыревой за помощь в наблюдениях и обработке данных. Работа выполнялась частично на средства гранта Президента “Школа им. Хайкина”. Наблюдения на РАТАН-600 проводились при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. K. Dubrovich, *Astron. Astrophys. Trans.* **5**, 57 (1994).
2. V. K. Dubrovich and A. A. Lipovka, *Astronom. and Astrophys.* **296**, 301 (1995).
3. V. K. Dubrovich, *Astronom. and Astrophys.* **324**, 27 (1997).
4. И. В. Госачинский, В. К. Дубрович, С. Р. Желенков и др., *Астрон. ж.* **79**, 601 (2002).
5. И. В. Госачинский, В. К. Дубрович, А. П. Венгер и Г.Н.Ильин, *Астрофизический бюллетень* **63**, 290 (2008).
6. C. M. Persson, R. Maoli, P. Encarnas, et al., *Astronom. and Astrophys.* **515**, 72 (2010).
7. Н. Ф. Есепкина, Н. С. Бахвалов, Б. А. Васильев и др., *Астрофиз. Исслед. (Известия САО)* **11**, 182 (1979).
8. А. М. Пилипенко и В. А. Прозоров, *Препринт №114 САО РАН (Санкт-Петербург, 1995)*.
9. С. В. Логвиненко и др., *Астрофизический бюллетень* **63**, 193 (2008).
10. C. Gregory, W. K. Scott, K. Douglas, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **103**, 427 (1996).
11. Е. К. Майорова, *Кандидатская диссертация по математике и физике (САО РАН, Ленинград, 1986)*.

**SPECTRAL AND SPATIAL FLUCTUATIONS OF COSMIC MICROWAVE
BACKGROUND RADIATION. RATAN-600 RADIO TELESCOPE
OBSERVATIONS WITH A FOURIER SPECTRAL ANALYZER**

A. P. Venger, I. V. Gosachinskij, V. K. Dubrovich

The “circumpolar survey” technique allowed us to achieve a rather high antenna temperature sensitivity of 0.5 mK at 6 cm on a fixed antenna with a relatively narrow frequency resolution band (600 kHz) and an angular resolution of $45'' \times 7'$. Starting from 2007 we use a Fourier spectral analyzer with a survey band 10 times broader than that of previous observations. This upgrade allowed us to rapidly perform repeated test observations, which confirmed the power-law nature and the frequency structure of spatial spectra in two strips in the vicinity of the celestial pole in the $4'-16'$ interval of angular periods. These observations also showed that the Galactic CH molecular line that was by chance captured in our survey strip (Λ -doubling of rotational transition) has nothing to do with the emission spectra we obtained. The angular pattern of emission in two main lines of Λ -doubling (4847.84 and 4870.12 MHz) is absolutely different, whereas there is practically no maser amplification in the CH line to explain this fact. Our observations also confirm the H I 10α line (4874.157 MHz), which forms in the tenuous ionized Galactic hydrogen at such relatively high latitudes. Other features of the spatial spectra also appear to be quite real, although their interpretation remains unclear and requires further studies.

Keywords: *radio continuum: general—cosmology: cosmic background radiation—
—methods: observational: radio astronomy*