

УДК 524.827-14(084)

## ИСКАЖЕНИЯ СПЕКТРА МОЩНОСТИ ОДНОМЕРНЫХ СЕЧЕНИЙ КАРТ СМВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ КОСМОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ. II

© 2013 Я. В. Найден\*, О. В. Верходанов\*\*

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 15 мая 2013 года; принята в печать 11 июня 2013 года

Исследуется влияние уровня изменения космологических параметров на спектры мощности одномерных сечений карт реликтового излучения в узком диапазоне пространственных частот. Вариации параметров плотности  $\Omega_b$  и  $\Omega_\Lambda$  мало влияют на отклонение спектра мощности от ожидаемой в модели  $\Lambda$ CDM. В то же время вариации показателя спектра первичных возмущений существенно отражаются на амплитуде спектра мощности одномерных сечений. Также наблюдается недостаток сигнала чётных гармоник в ILC-карте по сравнению с ожидаемым в модели.

Ключевые слова: *реликтовое излучение*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В данной работе мы продолжаем исследовать возможности анализа флуктуаций фонового излучения по спектрам мощности одномерных сечений карт реликтового излучения. В первой работе (далее Paper I) [1] мы исследовали границы вариаций энергетического Фурье-спектра в зависимости от космологической модели в случае включения в анализ низких гармоник. Для рассмотренного случая спектр мощности является слабочувствительным к космологическим вариациям, хотя для некоторых параметров, например, показателя спектра мощности первичных возмущений плотности  $n_s$ , наблюдаются вполне регистрируемые искажения спектра. Отметим, что на чувствительность к вариациям параметров, а следовательно, и на точность их измерения влияет много причин. К ним относятся и стабильность методов восстановления, и размер и положение исследуемой области относительно плоскости Галактики, и число пикселей, участвующих в процедуре разделения для заданного спектрального индекса компонент излучения.

Ранее, в работе Paper I, мы уже обсуждали особенности анализа одномерных данных и отражение случайного распределения сигнала на спектре мощности. Коротко напомним отдельные моменты. Несмотря на наличие архивов карт всего неба в микроволновом диапазоне длин волн [2–8], некоторые задачи исследования распределения излучения в одномерных сечениях остаются актуальными [9–15]. Отметим среди них поиск и изучение анизотропных областей в распределенном

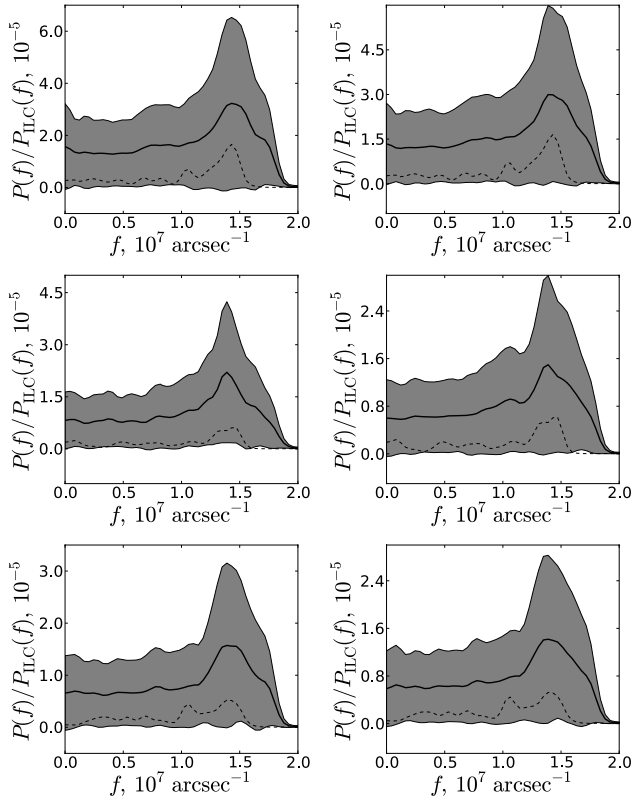
излучении нашей Галактики и реликтового сигнала [10, 16–18], исследование процессов вторичной ионизации межгалактического газа [19], наблюдаемых благодаря кинематическому эффекту Сюняева–Зельдовича, исследование фона в области Солнечной системы, обусловленного пылью и солнечным ветром. Все эти направления связаны с точностью построения спектра мощности при неполных наблюдениях неба и отражения в таком сигнале реальных физических процессов. Поэтому наряду с моделированием сигнала для различных космологических моделей мы применяли и процедуру разделения компонент, которая сама по себе является стабильной [20–22].

Как и в работе Paper I, мы использовали данные миссии WMAP седьмого года наблюдений по фоновому излучению в каналах  $Q$  и  $V$  и космическому микроволновому фону (СМВ — Cosmic Microwave Background), представленному картой ILC (Internal Linear Combination). Кроме того, с использованием утилиты `cl2map` пакета `GLESP` [23] были проведены стандартные процедуры моделирования карт сигнала реликтового фона в моделях с гауссовыми первичными флуктуациями плотности.

В продолжение работ, где исследовалось влияние величины некоторых космологических параметров на энергетические спектры одномерных сечений карт распределения анизотропии температуры [1, 9], мы изучили последствия применения карты с двусторонним гармоническим ограничением сигнала. Как и в работе Paper I, использовались карты фоновых компонент Галактики в каналах  $Q$  и  $V$  из архива WMAP7, применялись процедуры

\*E-mail: yarnaid@gmail.com

\*\*E-mail: vo@sao.ru



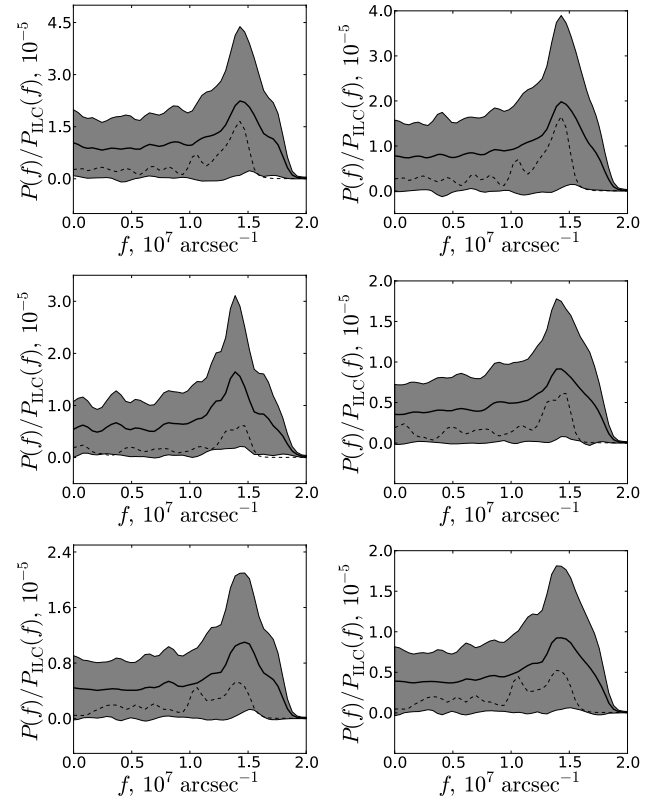
**Рис. 1.** Спектры мощности одномерных сечений карт для  $\Omega_b = 0.0462$ ,  $90 \leq \ell \leq 120$ . В верхнем ряду приведены рисунки с данными всех гармоник, в среднем — данные по чётным гармоникам, в нижнем — по нечётным. Слева: результат моделирования с добавлением фоновых компонент и выделением сигнала. Справа: результат моделирования без фоновых компонент. Серым цветом показан  $1\sigma$ -разброс по результатам моделирования.

разделения компонент в пиксельном пространстве с построением однородной выборки [24], а также моделирования случайного сигнала СМВ.

В данной статье, мы приводим результаты моделирования и оценок как для заданного диапазона мультиполей, так и для разделения мультиполей по чётным и нечётным гармоникам. Для построения одномерных сечений, как в Paper I, мы взяли область  $\delta = 41^\circ$ . Выбор связан с тем, что на склонении  $41^\circ$  на радиотелескопе РАТАН-600 проведен обзор RZF (RATAN-600 Zenith Field) в сантиметровом диапазоне [25] и особенностями этого сечения, связанными с двойным пересечением галактической плоскости.

## 2. АНАЛИЗ ДАННЫХ

Для гармонического разложения сигнала на сфере применялись процедуры пакета GLESP [26]



**Рис. 2.** Спектры мощности одномерных сечений карт для  $\Omega_\Lambda = 0.14$ ,  $90 \leq \ell \leq 120$ . Расположение графиков аналогично Рис. 1.

с представлением распределения анизотропии температуры  $\Delta T(\theta, \phi)$  в виде

$$\Delta T(\theta, \phi) = \sum_{\ell=2}^{\infty} \sum_{m=-\ell}^{\ell} a_{\ell m} Y_{\ell m}(\theta, \phi), \quad (1)$$

где  $(\theta, \phi)$  — полярные координаты,  $\ell$  и  $m$  — соответственно номер мультиполя и его мода. Коэффициенты при сферических гармониках вычисляются как

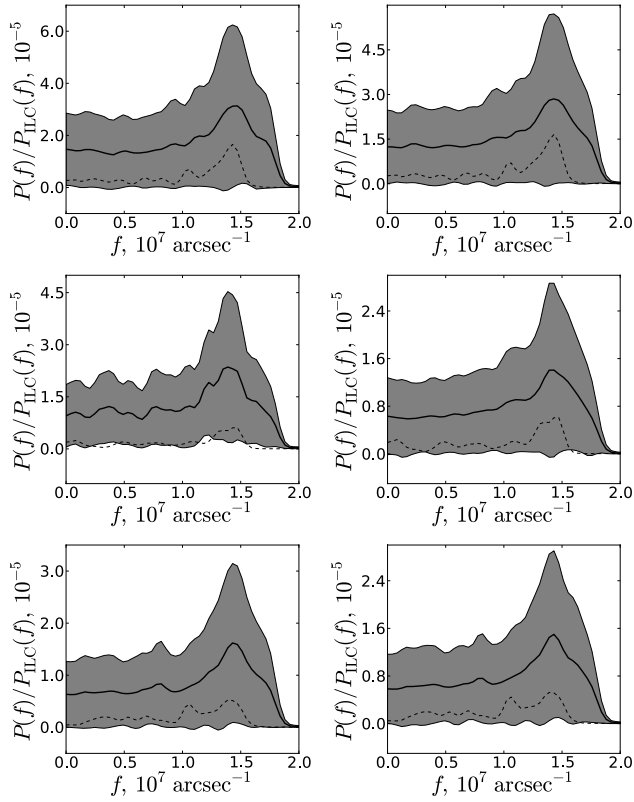
$$a_{\ell m} = \int_{-1}^1 dx \int_0^{2\pi} d\phi \Delta T(x, \phi) Y_{\ell m}^*(x, \phi), \quad (2)$$

где  $x = \cos(\theta)$ , а  $Y_{\ell m}(\theta, \phi)$  — сферические функции. Угловой спектр мощности на сфере определяется как

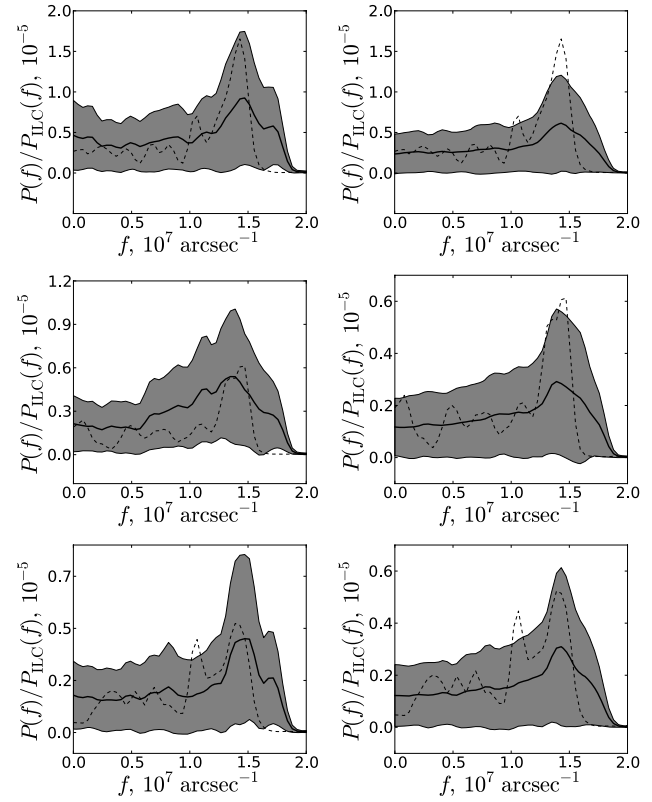
$$C_\ell = \frac{1}{2\ell + 1} \sum_{m=-\ell}^{\ell} |a_{\ell m}|^2. \quad (3)$$

Следуя Paper I, мы анализировали данные поэтапно, проделав следующие шаги:

- 1) задание параметров космологической модели и вычисление ее спектра мощности;



**Рис. 3.** Спектры мощности одномерных сечений карт для  $\Omega_\Lambda = 0.7$ ,  $90 \leq \ell \leq 120$ . Расположение графиков аналогично Рис. 1.



**Рис. 4.** Спектры мощности одномерных сечений карт для  $n_s = 0.048$ ,  $90 \leq \ell \leq 120$ . Расположение графиков аналогично Рис. 1.

- 2) генерирование ста случайных карт по спектру мощности;
- 3) гармоническое разложение карт;
- 4) моделирование реального сигнала с добавлением галактических фоновых компонент из архива миссии WMAP;
- 5) разделение компонент;
- 6) построение одномерных сечений карт на склоне  $\delta = 41^\circ$  и вычисления соответствующего спектра мощности;
- 7) оценка доверительного интервала по полученным моделям.

Исходные данные каналов и карты ILC были взяты из архива LAMBDA<sup>1</sup> семилетнего обзора WMAP. Для построения теоретического спектра мощности для заданных космологических параметров мы использовали пакет CAMB [27], основанный на CMBFast [28]. Случайные карты моделировались с помощью процедуры `c12map` из пакета GLESP [26]. В качестве основной космологической модели, параметры которой варьировались, мы взяли стандартную согласованную  $\Lambda$ CDM-космологическую

модель [29]. Изменялась та же группа параметров:  $\Omega_b + \Omega_c$ ,  $\Omega_\Lambda$ ,  $n_s$ , как и в [1]. За начальное значение параметра принималась его величина в  $\Lambda$ CDM-космологии, а на каждом  $i$ -ом шаге мы меняли его на  $\pm 5i\%$  от исходного значения. Подобно Paper I, для выделения искомого сигнала применялся метод разделения компонент с построением подвыборки пикселей с близкими весами [24]. Причем, как и в [1], ширина подвыборки из гистограммы распределения пикселей составила  $\Delta = 0.02$ , а минимальный размер подвыборки задавался равным пяти пикселям.

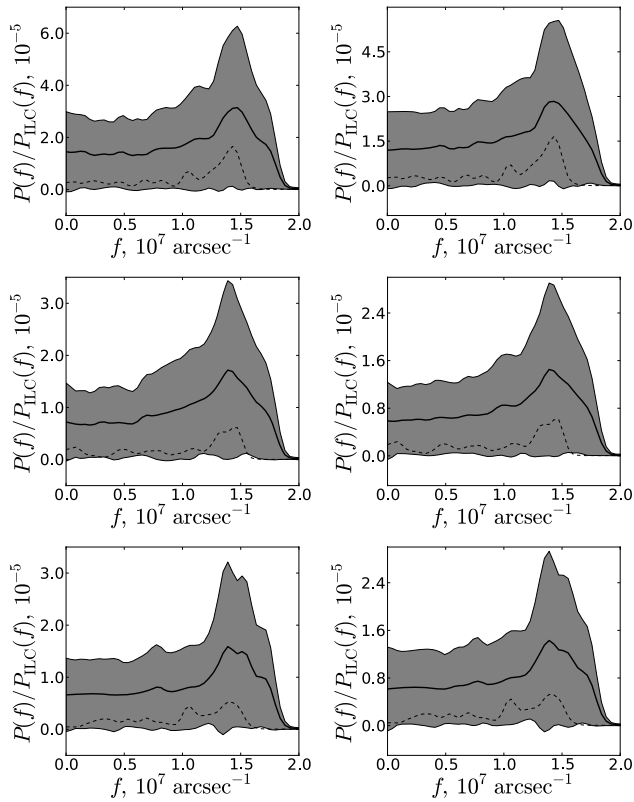
Мы использовали каналы  $Q$  и  $V$  и карту ILC обзора WMAP седьмого года, а также стандартную согласованную  $\Lambda$ CDM-космологическую модель в качестве входных данных. В этих картах (как и в модельных) для анализа были выделены следующие наборы мультиполей: чётные/нечётные<sup>2</sup> в диапазонах  $2 \leq \ell \leq 100$  и  $90 \leq \ell \leq 120$ .

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Для начала рассмотрим спектры мощности одномерных сечений карт с разрешением

<sup>2</sup> $(\ell + m) \bmod 2 = 1$  — нечётные,  $(\ell + m) \bmod 2 = 0$  — чётные.

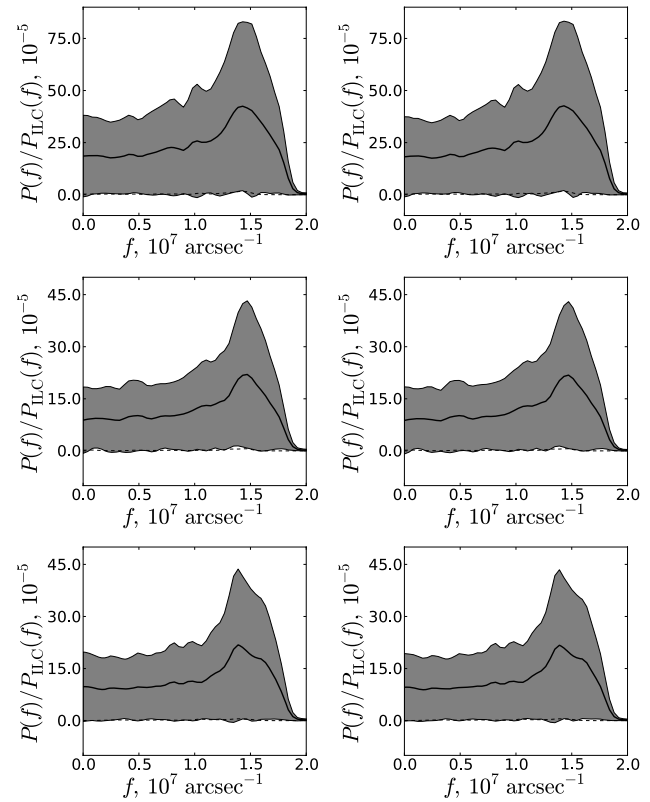
<sup>1</sup><http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/map/current/>



**Рис. 5.** Спектры мощности одномерных сечений карт для  $n_s = 0.96$ ,  $90 \leq \ell \leq 120$ . Расположение графиков аналогично Рис. 1.

$90 \leq \ell \leq 120$ . Этот диапазон гармоник интересен тем, что в нем содержится меньше низкочастотных шумов, чем в диапазоне  $2 \leq \ell \leq 100$ .

На Рис. 1 представлены результаты вычислений для  $\Omega_b = 0.0462$ ,  $90 \leq \ell \leq 120$ . Сплошной линией отмечено математическое ожидание сигнала, оцененное по ста случайным реализациям в модельном эксперименте. Серый фон показывает область  $1\sigma$ -разброса, а пунктир соответствует ILC-карте. Слева показаны результаты моделирования с использованием фоновых компонент, справа — без них. В верхнем ряду приведены графики, для построения которых в расчетах использовались все гармоники из заданного диапазона, в среднем — только чётные гармоники, в нижнем — только нечётные. Из рисунков видно, что для рассчитанных моделей сигнал между чётными/нечётными гармониками распределен приблизительно в равных долях. График для данной карты ILC демонстрирует иную картину: сигнал практически полностью сосредоточен в нечётных гармониках. Такое поведение свойственно всем моделям, где мы варьировали  $\Omega_b$ . Это свойство нечётности карт СМВ уже отмечалось в работах [30, 31]. Модели слабо чувствительны к изменениям параметра  $\Omega_b$ , поэтому приведена только одна из них.



**Рис. 6.** Спектры мощности одномерных сечений карт для  $n_s = 2.352$ ,  $90 \leq \ell \leq 120$ . Расположение графиков аналогично Рис. 1.

На Рис. 2 и 3 показаны результаты моделирования сигнала и вычисления соответствующего энергетического спектра только для  $\Omega_\Lambda = 0.14$  и  $0.7$ . Из них видно, что с ростом  $\Omega_b$  растут и средние значения квадратов амплитуд гармоник (спектров мощности) одномерных сечений моделированных карт. При этом в рассматриваемом диапазоне спектр ILC-карты расположен в пределах  $1\sigma$ -области по данным моделирования, как и в случае варьирования  $\Omega_b$ . Все сказанное про свойства чётности параметра  $\Omega_b$  можно отнести и к этим моделям. Но здесь появляется еще один примечательный факт: при моделировании с разделением компонент  $\Omega_\Lambda = 0.7$  низкочастотная часть (до пика) спектра чётных гармоник ILC-карты по форме очень близка к среднему модельному значению, а для нечётных гармоник аналогичная область наблюдается в высокочастотном диапазоне (около пика). Для моделей без разделения этот эффект не наблюдается, что означает, что причиной данного эффекта является само выделение общей части сигнала из данных каналов.

На Рис. 4, 5 и 6 отображены результаты моделирования для спектрального индекса  $n_s$ , равного 0.048, 0.96 и 2.352 соответственно. Заметна сильная чувствительность энергетического спек-

тра к вариации этого параметра. Например, на Рис. 4 спектр для сечения ИЛС-карты оказывается за пределами  $1\sigma$ . Таким образом, имеется принципиальная возможность проверки соответствия наблюдательных данных и теоретических расчетов. Свойства статистики средних значений монотонны и хорошо видно из представленных рисунков.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы рассмотрели влияние вариации космологических параметров на спектры мощности одномерных сечений карт для разных наборов гармоник. Как и в работе [1] (в которой были рассмотрены данные в широком диапазоне мультиполей  $2 \leq \ell \leq 100$ ), для  $90 \leq \ell \leq 120$  можно заключить, что вариации ряда параметров, таких как  $\Omega_b$  и  $\Omega_\Lambda$ , остаются малозаметными (внутри гауссовой дисперсии) на энергетическом спектре. Однако в отличие от [1], для исследуемого диапазона эффект вариации показателя спектра мощности искажает спектр довольно значительно. Этот факт говорит о возможности измерения некоторых космологических параметров, связанных с наблюдаемой амплитудой углового спектра мощности, например таких как спектральный индекс  $n_s$  или оптическая толщина эпохи реионизации, при других известных (фиксированных) параметрах по данным спектра мощности одномерных сечений карт.

Любопытно отметить полученный результат, согласно которому в диапазоне гармоник  $2 \leq \ell \leq 100$  имеется недостаток сигнала карты ИЛС на малых частотах одномерных сечений при моделировании как с выделением сигнала из фоновых компонент, так и без него. Кроме того, наблюдается различие в спектрах мощности для карт чётных и нечётных гармоник. Предполагается исследовать данный факт для наблюдений миссии Planck, которые недавно появились в открытом доступе.

В перспективе предлагаемый подход может быть также применён при анализе данных космического проекта “Миллиметр”, а также других неполных обзоров неба. После опубликования данных миссии Planck [32] мы планируем применить описанную методику также и к новым наблюдениям.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

В данной работе авторы использовали систему обработки радиоастрономических данных FADPS ([http://sed.sao.ru/~vo/fadps\\_e.html](http://sed.sao.ru/~vo/fadps_e.html)) [33, 34] и пакет GLESP (<http://www.glesp.nbi.dk>) [23, 35] для анализа данных на сфере. Работа поддержана грантом РФФИ № 13-02-00027.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ya. V. Naiden and O. V. Verkhodanov, *Astrophysical Bulletin* **68**, 226 (2013).
2. C. L. Bennett, M. Halpern, G. Hinshaw, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **148**, 1 (2003).
3. C. L. Bennett, R. S. Hill, G. Hinshaw, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **148**, 97 (2003).
4. D. N. Spergel, L. Verde, H. V. Peiris, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **148**, 175 (2003).
5. G. Hinshaw, D. N. Spergel, L. Verde, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **170**, 288 (2007).
6. G. Hinshaw, J. L. Weiland, R. S. Hill, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **180**, 225 (2009).
7. N. Jarosik, C. L. Bennett, J. Dunkley, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **192**, 14 (2011).
8. C. L. Bennett, D. Larson, J. L. Weiland, et al., submitted to *Astrophys. J. Suppl.*; arXiv:1212.5225.
9. H. E. Jørgensen, E. V. Kotok, I. D. Novikov, et al., *Int. J. Modern Phys. D* **9**, 127 (2000).
10. P. D. Naselsky, P. R. Christensen, P. Coles, et al., *Astrophysical Bulletin* **65**, 101 (2010).
11. L.-Y. Chiang, P. Coles, P. Naselsky, and P. Olesen, *J. of Cosmology and Astroparticle Phys.* **01**, 021 (2007).
12. M. L. Khabibullina, O. V. Verkhodanov, and Yu. N. Parijskij, *Astrophysical Bulletin* **63**, 95 (2008).
13. M. L. Khabibullina, O. V. Verkhodanov, and Yu. N. Parijskij in *Proc. Int. Conf. on Problems of Practical Cosmology*, Ed. by Yu. Baryshev, I. N. Taganov, and P. Teerikorpi (Russian Geographical Society, St. Petersburg, 2008), p. 239.
14. P. Naselsky, I. Novikov, Yu. Parijskij, and P. Teibulev, *Int. J. of Modern Phys. D* **8**, 581 (1999).
15. D. Novikov and H. Jørgensen, *Astrophys. J.* **471**, 521 (1996).
16. M. Cruz, E. Martinez-Gonzalez, P. Vielva, and L. Cayon, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **356**, 29 (2005).
17. M. Hansen, W. Zhao, A. M. Frejsel, et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **426**, 57 (2012).
18. O. B. Verkhodanov, *УФН* **182**, 1177 (2012).
19. A. G. Doroshkevich, S. V. Pilipenko, *Astronomy Reports* **55**, 567 (2011).
20. P. D. Naselsky and O. V. Verkhodanov, *Astrophysical Bulletin* **62**, 203 (2007).
21. P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov, and M. T. B. Nielsen, *Astrophysical Bulletin* **63**, 216 (2007).
22. C. J. Copi, D. Huterer, D. J. Schwarz, and G. D. Starkman, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **418**, 505 (2011).
23. A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov, et al., *Int. J. of Modern Phys. D* **14**, 275 (2005).
24. A. G. Doroshkevich and O. V. Verkhodanov, *Phys. Rev. D* **83**, 3002 (2011).
25. Yu. N. Parijskij, N. N. Bursov, A. B. Berlin, et al., *Gravitation and Cosmology* **11**, 139 (2005).
26. O. V. Verkhodanov, A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, et al., *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **58**, 40 (2005).

27. A. Lewis, A. Challinor, and A. Lasenby, *Astrophys. J.* **538**, 473 (2000).
28. U. Seljak and M. Zaldarriaga, *Astrophys. J.* **469**, 437 (1996).
29. N. Jarosik, C. L. Bennett, J. Dunkley, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **192**, 14 (2011).
30. K. Land and J. Magueijo, *Phys. Rev. D* **72**, 101302 (2005).
31. F. R. Urban and A. R. Zhitnitsky, *Phys. Rev. D* **82**, 123532 (2011).
32. J. A. Tauber, N. Mandolesi, J.-L. Puget, et al., 2010, *Astronom. and Astrophys.* **520**, A1 (2010).
33. O. V. Verkhodanov, *ASP Conf. Ser.* **125**, 46 (1997).
34. O. V. Verkhodanov, B. L. Erukhimov, M. L. Monosov, et al., *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **36**, 132 (1993).
35. A. G. Doroshkevich, O. B. Verkhodanov, P. D. Naselsky, et al., *Int. J. of Modern Phys. D* **20**, 1053 (2011).

## **Power Spectrum Distortions of CMB Map One-Dimensional Cross-Sections Depending on the Cosmological Model. II**

**Ya. V. Naiden, O. V. Verkhodanov**

We examine the effect produced by the variation of cosmological parameters on the power spectra of one-dimensional cross-sections of the cosmic microwave background maps in a narrow range of spatial frequencies. Variation of the  $\Omega_b$  and  $\Omega_\Lambda$  density parameters has little effect on the power spectrum deviation from the one expected within the  $\Lambda$ CDM model. At the same time, variations in the spectral index of primordial fluctuations significantly affect the amplitude of the power spectrum of one-dimensional cross-sections. We observe a lack of signal generated by the even harmonics in the ILC map as compared with model expectations.

Keywords: *cosmic background radiation*