

УДК 524.827

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

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

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 16 ноября 2012 года; принята в печать 20 марта 2013 года

Исследуется влияние вариации параметров космологической модели на спектр мощности одномерных сечений карт реликтового фона. Также исследуется возможность определения этих параметров при анализе одномерных данных. Рассматриваются особенности работы процедуры разделения компонент, приводящие к дополнительным ограничениям на точность восстановления исходного спектра. При сохранении в карте низких гармоник спектр мощности одномерного сечения будет слабо чувствителен к вариациям ряда космологических параметров. Тем не менее, имеются перспективы анализа одномерных данных при поиске и исследовании аномальных эффектов.

Ключевые слова: *реликтовое излучение*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Целая группа методов исследования распределения сигнала микроволнового фона (СМВ — Cosmic Microwave Background) связана с изучением свойств одномерных сечений полной карты неба. Здесь можно выделить гармонический анализ [1], корреляционные методы [2, 3], кластерный анализ [5, 6] и топологические методы [7].

Несмотря на отсутствие простой связи между сферическими гармониками карты и Фурье-гармониками одномерных сечений этих карт, представляет несомненный интерес исследование возможности определения космологических параметров (либо ограничения их значений) по данным одномерного сигнала Фурье-спектра сечения полной карты неба. Появление данных космического эксперимента WMAP на сайте LAMBDA<sup>1</sup> (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) [8–13] с субградусным разрешением определило развитие большого числа методов разделения, восстановления и исследования сигнала на сфере (см. обзоры [11–13]). Отметим, что в настоящее время задача исследования углового спектра мощности в различных космологических моделях, а также связи ошибок его измерения и определяемых свойств сигнала в одномерном сечении методически представляется более простой, чем до запуска спутника WMAP по двум причинам: 1) существование принятой

астрономическим сообществом карты СМВ (например, восстановленного сигнала методом внутренней линейной комбинации ILC (Internal Linear Combination) [11, 12]); 2) наличие стандартизованных методов симуляции карт сигнала реликтового фона в моделях с гауссовыми первичными флуктуациями плотности.

Важным моментом нам представляется возможность изучения с помощью одномерных сечений уровня отклонения от стандартной космологической модели после применения процедуры разделения и удаления галактических фоновых компонент. Данный подход может быть применен для исследований фона на РАТАН-600 [14–16], в космическом проекте “Миллиметрон,”<sup>2</sup> а также других при анализе данных неполных обзоров неба.

Ранее теоретически уже исследовалось [5] влияние некоторых космологических параметров на одномерное распределение анизотропии температуры. В данной работе мы усложнили задачу, добавив процедуру разделения компонент, но сделали более простой анализ результатов, используя известную карту СМВ и набор численных симуляций для анализа реальных данных.

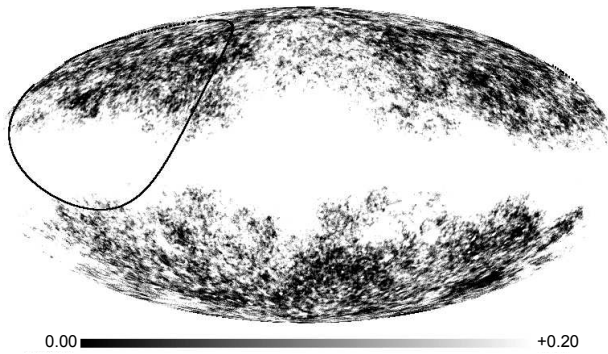
В предлагаемой статье будет дано описание метода исследования одномерных сечений (Раздел 2) и рассмотрены результаты его применения (Раздел 4). В Заключение мы обсудим результаты и возможности анализа одномерных данных из архивов карт микроволнового фона.

\*E-mail: yarnaid@gmail.com

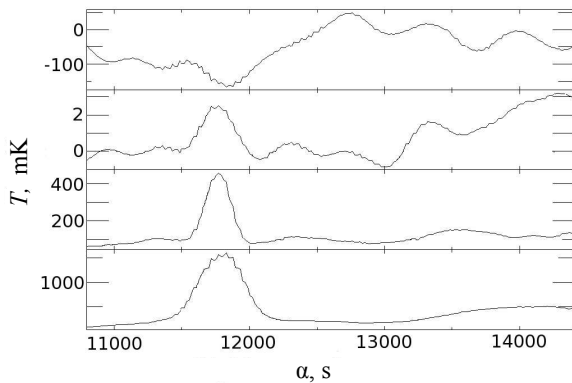
\*\*E-mail: vo@sao.ru

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

<sup>2</sup><http://asc-lebedev.ru>



**Рис. 1.** Область одномерного сечения на склонении  $\delta = 41^\circ$ , отмеченная черной линией на карте синхротронного излучения WMAP на частоте 23 ГГц в галактических координатах. Верхний уровень отображаемых значений сигнала ограничен величиной 0.2 мК, чтобы подчеркнуть область излучения Галактики.



**Рис. 2.** Сечения областей плоскости Галактики на склонении  $\delta = 41^\circ$ . На верхнем графике приведены данные СМВ WMAP. На следующих трех данные карты пыли, свободно-свободного и синхротронного излучения соответственно. Максимум на распределении галактических фоновых излучений соответствует излучению плоскости Галактики. В этой же области карты СМВ наблюдается локальный минимум излучения [2].

## 2. МЕТОД АНАЛИЗА

### 2.1. Выбор области сечения

Для анализа сигнала мы выбрали склонение проводимого на радиотелескопе RATAN-600 ( $\delta \sim 41^\circ$ ) обзора RZF (RATAN-600 Zenith Field) [17]. В процессе этого обзора исследуются как распределение яркости неба в сантиметровом диапазоне длин волн, так и статистические свойства радиоисточников [18]. Отметим, что сечение карт микроволнового излучения на склонении  $\delta = 41^\circ$  является в своем роде оптимальным, так как два раза проходит через плоскость Галактики, а с учетом интенсивности синхротронного излучения оказывается, что почти половина радиосигнала приходит из Млечного Пути (см. Рис. 1).

Особенности свойств сигнала СМВ в этой области уже исследовались ранее по данным WMAP [2, 3] и, в частности, была обнаружена антикорреляция сигнала карты СМВ WMAP и галактических фоновых компонент. Эта антикорреляция, кроме распределения корреляционных коэффициентов в полученной карте и моделях, наблюдается просто в соответствующих сечениях компонент излучения (Рис. 2).

Для анализа использовались данные каналов  $Q$  (на частоте 41 ГГц) и  $V$  (61 ГГц) космического эксперимента WMAP, доступные в публичном архиве на сайте LAMBDA. На Рис. 3 приведены карты сигналов в частотных каналах  $Q$  и  $V$  WMAP. Спектры мощности этих карт показаны на Рис. 4.

Спектры мощности для сечений карт каналов WMAP  $Q$  и  $V$  на склонении  $\delta = 41^\circ$  приведены на Рис. 5, сечения карт показаны на Рис. 6

## 3. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВАРИАЦИИ СИГНАЛА

Для вычисления углового спектра мощности анизотропии СМВ, определяемого как  $C_\ell = (2\ell + 1)^{-1} \sum_{m=-\ell}^{\ell} |a_{\ell m}|^2$ , используется стандартное разложение сигнала на сфере по сферическим гармоникам (мультиполям) в полярных координатах  $Y_{\ell m}(\theta, \phi)$ :

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

Здесь  $a_{\ell m}$  — коэффициенты при сферических гармониках с номером мультиполя  $\ell$  и модой этого мультиполя  $m$ , вычисляемые из разложения анизотропии температуры фона как

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

$$x = \cos(\theta),$$

где символ \* обозначает комплексное сопряжение. Сферические функции определяются в виде

$$Y_{\ell m}(\theta, \phi) = \sqrt{\frac{(2\ell + 1)(\ell - m)!}{4\pi(\ell + m)!}} P_{\ell}^m(\cos\theta) e^{im\phi},$$

где  $P_{\ell}^m(x, y)$  — присоединенные полиномы Лежандра. Для гармонического разложения карты на мультиполи применялся пакет анализа протяженного излучения на сфере GLESP [19].

Построение теоретического углового спектра мощности как функции космологических параметров  $C_\ell(\Omega_\Lambda, \Omega_b, \Omega_{\text{CDM}}, H_0, n_s, \dots)$  реализовано в

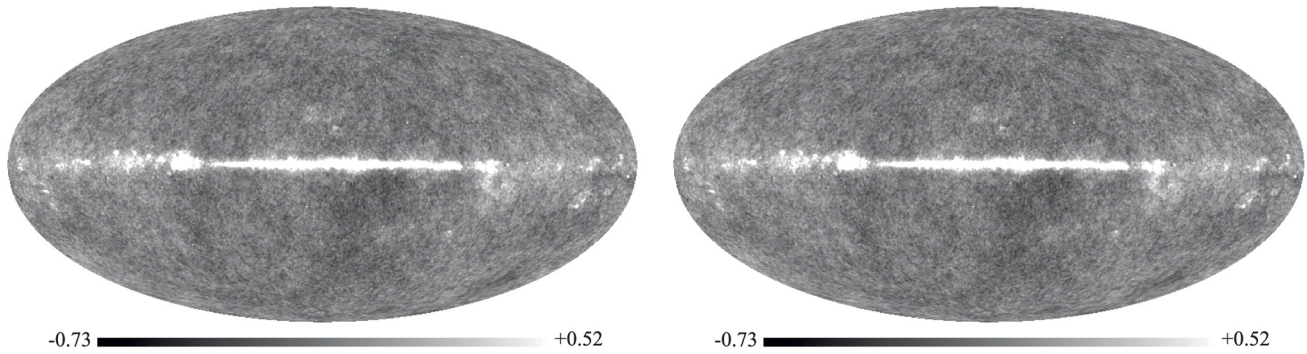


Рис. 3. Карты сигнала каналов WMAP  $Q$  (слева) и  $V$  (справа) с разрешением  $\ell_{\max} = 1024$ .

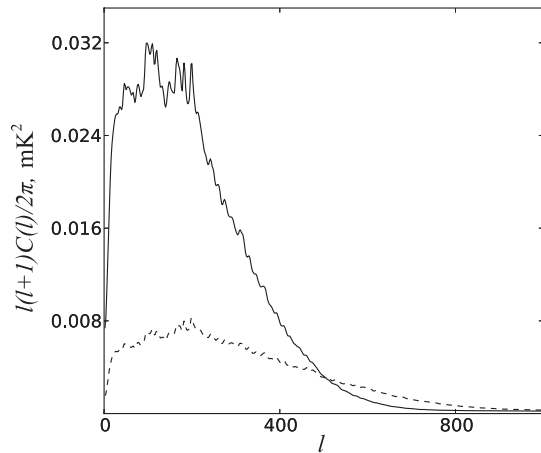


Рис. 4. Спектры мощности карт WMAP, построенных по данным каналов  $Q$  (сплошная линия) и  $V$  (пунктир).

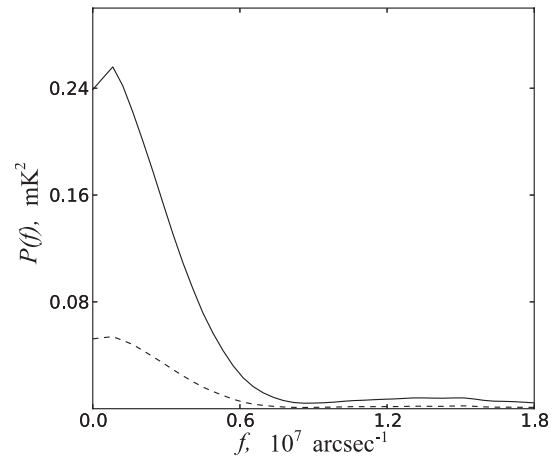


Рис. 5. Спектры мощности одномерных сечений карт на склонении  $\delta = 41^\circ$  для данных каналов  $Q$  (сплошная линия) и  $V$  (пунктир).

программе CAMB<sup>3</sup> [20], основанной на процедуре CMBFast [21]. Для генерирования случайных гауссовых карт СМВ по заданному спектру мощности применялась процедура `s12map` пакета GLESP [22]. Карты галактических фоновых компонент были взяты с сайта LAMBDA космического эксперимента WMAP в архиве данных 7-го года наблюдений.

Процедура анализа влияния вариаций космологических параметров на форму спектра мощности одномерного сечения карты состояла из нескольких этапов:

- 1) задание космологических параметров;
- 2) вычисление углового спектра мощности анизотропии СМВ для выбранной космологической модели;

<sup>3</sup><http://camb.info/>, доступна также в режиме online на сайте [http://lambda.gsfc.nasa.gov/toolbox/tb\\_camb\\_form.cfm](http://lambda.gsfc.nasa.gov/toolbox/tb_camb_form.cfm).

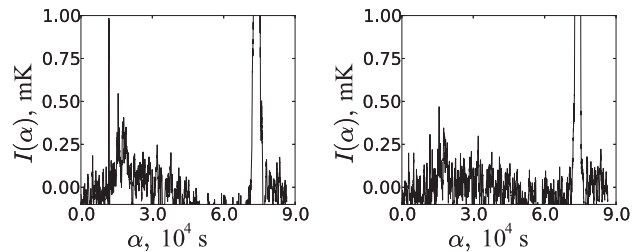


Рис. 6. Одномерные сечения каналов WMAP  $Q$  (слева) и  $V$  (справа) на склонении  $\delta = 41^\circ$ .

- 3) генерирование случайных гауссовых карт по данным углового спектра мощности;
- 4) моделирование сигнала в наблюдательном канале с помощью добавления реальных фоновых компонент к случайному сгенерированному сигналу;
- 5) разделение компонент;
- 6) построение одномерного сечения карты после

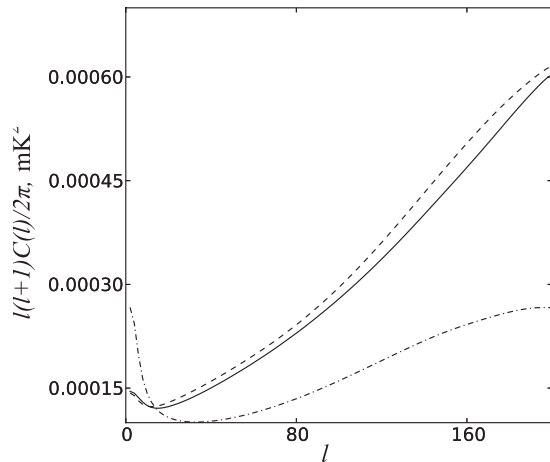


Рис. 7. Сгенерированный спектр мощности для различных космологических моделей (случай  $\Omega_b = 0.01$  отмечен сплошной линией,  $\Omega_\Lambda = 0.5$  — пунктиром,  $n_s = 0.5$  — штрих-пунктиром).

восстановления сигнала и вычисление соответствующего спектра мощности;

7) оценка доверительного интервала по результатам моделирования эксперимента методом Монте-Карло.

При построении углового спектра мощности СМВ использовалась стандартная  $\Lambda$ CDM-космологическая модель [13].

Чтобы получить оценки уровня искажения спектра мощности одномерного сечения, мы варьировали три параметра модели: соотношение плотности барионной материи  $\Omega_b$  и плотности холодной темной материи  $\Omega_{\text{CDM}}$  с сохранением их суммы, плотность темной энергии  $\Omega_\Lambda$  и показатель спектра мощности первичных возмущений плотности  $n_s$ . В данной задаче применялась простая схема вариации параметров, в которой постоянные параметры оставались равными принятым значениям в стандартной модели [24].

Сумму параметров  $\Omega_b$  и  $\Omega_{\text{CDM}}$  мы задавали равной 0.3 и меняли первый параметр от 0.01 до 0.3. Величину  $\Omega_\Lambda$  изменяли в диапазоне от 0.0 до 1.0, а  $n_s$  — от 0.0 до 2.0. При анализе моделей строилась сетка со ста шагами для каждого из параметров в приведенном диапазоне. На Рис. 7 показаны некоторые примеры спектров мощности смоделированных случайных карт. Сплошной линией обозначен случай с параметрами  $\Omega_b = 0.01$ , пунктиром —  $\Omega_\Lambda = 0.5$ , штрих-пунктиром —  $n_s = 0.5$ . Остальные параметры при расчетах соответствовали  $\Lambda$ CDM-модели.

Реальные фоновые компоненты  $\mathbf{F}_i$  в различных каналах WMAP, используемые в процессе моделирования, вычислялись как разность карты исходного сигнала  $\mathbf{S}_i$  и карты СМВ WMAP ILC,

приведенной в архиве с разрешением до  $\ell = 100$ . Таким образом,  $\mathbf{F}_i$  включает как галактические компоненты фонового излучения, так и внегалактические радиоисточники.

На этапе разделения фоновых компонент и выделения сигнала СМВ в численных моделях применялся пиксельный метод разделения для подвыборки гистограммы пикселей с близкими весами [23]. Как и в методе ILC, пиксели карты с наблюдательными данными ( $S_1$  и  $S_2$ ) описываются суммой сигналов СМВ ( $C$ ) и фона ( $F_1$  и  $F_2$ ):

$$S_1(p_i) = C(p_i) + F_1(p_i),$$

$$S_2(p_i) = C(p_i) + F_2(p_i).$$

Тогда выделяемый сигнал СМВ можно представить как

$$\begin{aligned} C(p_i) &= \alpha S_1(p_i) + (1 - \alpha) S_2(p_i) \\ &= S_2(p_i) + \alpha(S_1(p_i) - S_2(p_i)). \end{aligned}$$

Далее вводится функция однородности в виде

$$G_i = G(p_i) = G(S_1(p_i), S_2(p_i)),$$

распределение сигнала в которой позволяет выделить пиксели однородной выборки, то есть принадлежащие одному бину в гистограмме этого распределения. При этом для  $j$ -ого бина имеем

$$j \leq G_i/\Delta \leq j + 1,$$

для всех  $p_i$  из  $j$ -ого бина, где  $\Delta$  — ширина бина. Тогда в каждом бине можно вычислить  $\alpha_j$ , а с помощью этой величины отделить сигнал СМВ от фоновых компонент и получить полную карту распределения анизотропии сигнала. Следуя [23], мы провели разделение компонент с построением функции однородности на основе разности сигнала в каналах:

$$G_i = S_1(p_i) - S_2(p_i) = F_1(p_i) - F_2(p_i) = \beta_j(1 + \delta_i),$$

$$\langle \delta_i \rangle = 0, \quad |\delta_i| \leq \Delta/\beta,$$

где  $\beta_j$  — среднее значение для  $j$ -ого бина, а  $\delta_i$  — отклонение от этого среднего значения для  $i$ -ого пикселя. Тогда

$$C(p_i) = S_2(p_i) - (1 + \delta(p_i)) \langle S_2 \delta \rangle / \langle \delta^2 \rangle.$$

Размер бина мы приняли равным  $\Delta = 0.02$ . Кроме того, было наложено дополнительное условие: каждый бин должен содержать как минимум пять элементов. Примеры полученных карт показаны на Рис. 8. При построении каждой из карт мы брали один из приведенных ниже параметров отличным от  $\Lambda$ CDM-модели, а остальные не меняли:

$$\Omega_b = 0.01, \quad \Omega_\Lambda = 0.5, \quad n_s = 0.5.$$

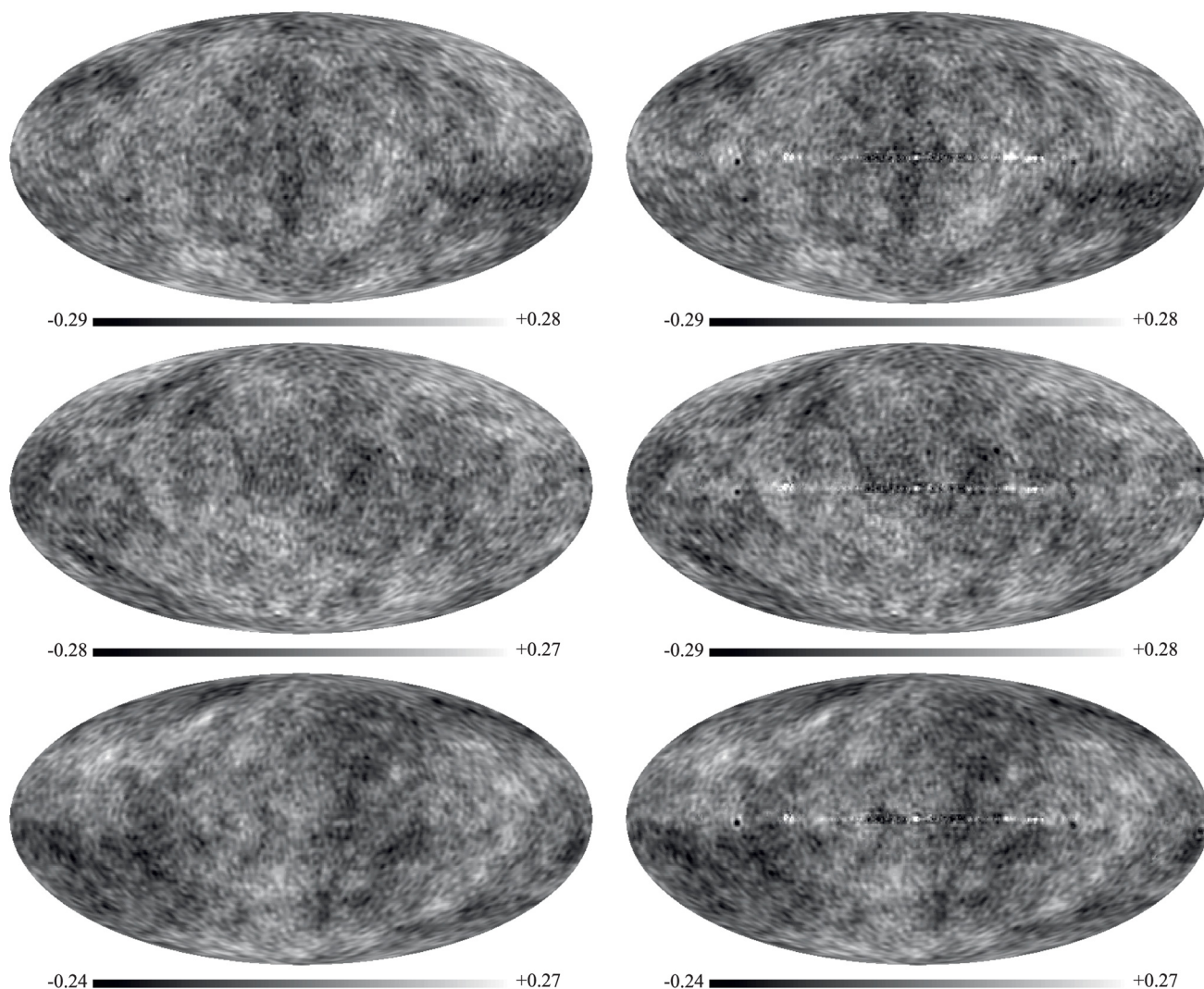


Рис. 8. Случайные карты до (справа) и после (слева) разделения компонент.

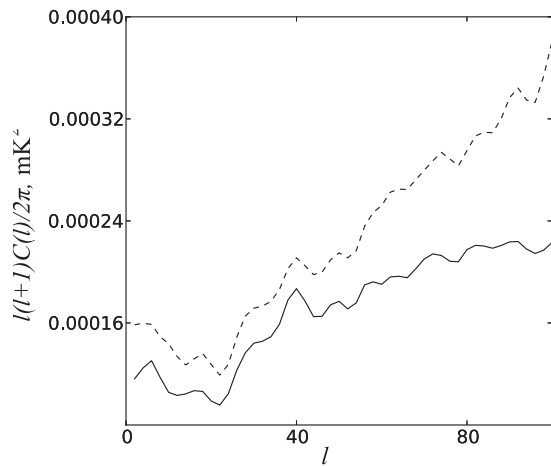
Одномерные сечения смоделированных карт строились для того же склонения  $41^\circ$ . После чего для данной выборки пикселей вычислялся спектр мощности. (см. примеры на Рис. 9 и 10). По результатам ста симуляций определялся  $1\sigma$ -разброс значений сигнала СМВ с гауссовыми возмущениями плотности в  $\Lambda$ CDM-космологической модели. Далее выполнялась процедура разделения компонент, предварительным шагом которой было добавление к модельному случайному гауссову сигналу СМВ галактических компонент, измеренных в миссии WMAP.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ

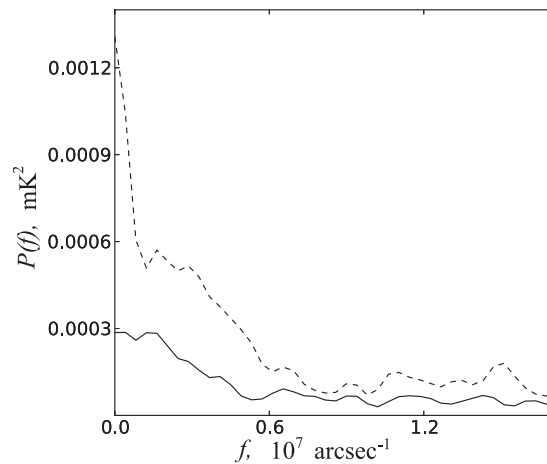
Как уже говорилось выше, при моделировании карт реликтового излучения по угловому спектру мощности варьировались космологические параметры, а именно:  $\Omega_b$  в диапазоне 0.01–0.3 и

$\Omega_{\text{CDM}}$ , равное  $0.3 - \Omega_b$ ;  $\Omega_\Lambda$  в диапазоне 0.0–1.0;  $n_s$  в диапазоне 0.0–2.0. Для каждого из этих трех случаев, были рассчитаны теоретические угловые спектры мощности для ста космологических моделей, соответствующих равномерному изменению величины космологического параметра в заданном диапазоне значений, и для каждой модели построены по сто реализаций случайных карт СМВ. На Рис. 11 показаны примеры одномерных сечений карт в моделях с  $\Omega_b = 0.01$ ,  $\Omega_\Lambda = 0.5$  и  $n_s = 0.5$ . На всех рисунках наблюдаются максимумы в интервале 70 000–80 000 s. Этот максимум появляется из-за присутствия сильного сигнала в плоскости Галактики. Похожие максимумы наблюдаются на сечениях карт исходных данных каналов  $Q$  и  $V$  (Рис. 3 и 6).

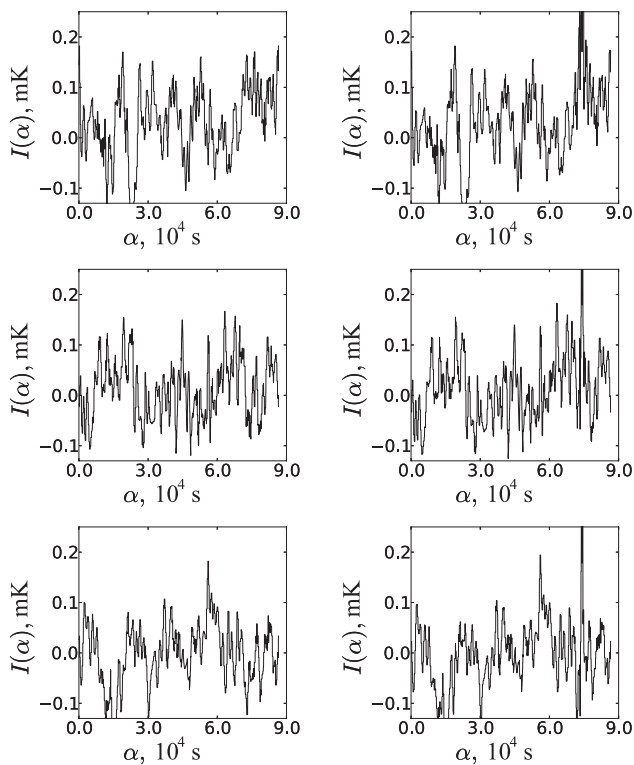
На Рис. 12 показаны примеры спектров мощности одномерных сечений карт на том же склонении, построенных для космологических моделей



**Рис. 9.** Спектры мощности ILC WMAP (сплошная линия) и полученные в результате разделения компонент в каналах  $Q$  и  $V$  (пунктир).



**Рис. 10.** Спектр мощности одномерного сечения ILC-карты (сплошная линия) и карты, полученной путем выделения сигнала из каналов  $Q$  и  $V$  (пунктир) с помощью однородных выборок отсчетов. Сильное различие в амплитуде на низких гармониках обусловлено очень слабым квадрупольным сигналом в карте ILC, который получается выше во втором методе [23].



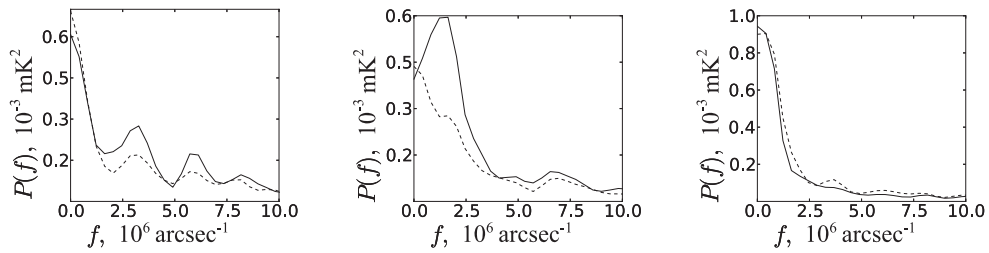
**Рис. 11.** Пример одномерных сечений карт СМВ на склонении  $\delta = 41^\circ$  в модели с параметрами  $\Omega_b = 0.01$ ,  $\Omega_\Lambda = 0.5$  и  $n_s = 0.5$  (сверху вниз соответственно). На оси абсцисс отложено прямое восхождение  $\alpha$  в секундах, на оси ординат интенсивность в мК.

с  $\Omega_b = 0.01$ ,  $\Omega_\Lambda = 0.5$  и  $n_s = 0.5$ . У всех спектров наблюдаются несколько близких по положению экстремумов, обусловленных влиянием плоскости Галактики.

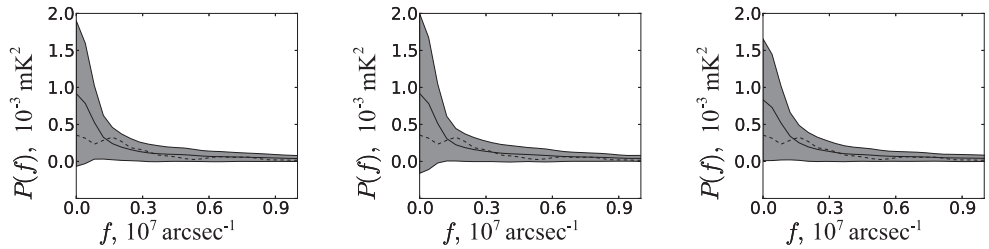
На Рис. 13 показаны примеры спектров мощно-

сти для ста различных случайных реализаций космологической модели с  $\Omega_b = 0.0462$ ,  $\Omega_\Lambda = 0.735$  и  $n_s = 0.96$ . Сплошной линией отмечено среднее значение по ста случайным реализациям, серый фон отображает  $1\sigma$ -разброс, обусловленный случайными вариациями, пунктир соответствует данным карты ILC WMAP. Спектр мощности сечения ILC-карты и область разброса для симуляций приведены на Рис. 14.

Все спектры мощности сечений моделей при вариации  $\Omega_b$  похожи друг на друга, и модель  $\Omega_b = 0.0462$  является их типичным представителем. Имеется максимум на малых частотах, который быстро убывает. Дисперсия также убывает с ростом частоты. Для всего рассмотренного диапазона все отсчеты спектра мощности сечения ILC-карты лежат в области  $1\sigma$  этого семейства моделей. Отметим, что подобная устойчивость спектра ожидается на низких гармониках при вариации  $\Omega_b$ , когда плотность материи постоянна и равна сумме барионного и темного вещества (так как на флуктуациях СМВ сказывается именно их сумма). При изменении  $\Omega_\Lambda$  поведение Фурье-спектров одномерных сечений относительно случайных вариаций оказалось аналогичным случаю с варьированием  $\Omega_b$ . Единственное отличие состоит в том, что среднее значение спектра мощности медленно растет с ростом  $\Omega_\Lambda$  (примерно от  $10^{-3}$  до  $10^{-2}$ ). Тем не менее, амплитуда спектров мощности карты ILC все равно не выходит за пределы области  $1\sigma$  при вариации космологических параметров. Случай вариации  $\Omega_\Lambda$  не является полностью подобным случаю с  $\Omega_b$ , т.к. изменение плотности темной



**Рис. 12.** Пример спектров мощности одномерных сечений карт на  $\delta = 41^\circ$ , построенных для моделей с  $\Omega_b = 0.01$ ,  $\Omega_\Lambda = 0.5$  и  $n_s = 0.5$  (пунктир). Также показаны случаи спектра мощности, соответствующего сечению карты, полученной при моделировании процесса разделения компонент по данным каналов  $Q$  и  $V$  (сплошная линия).



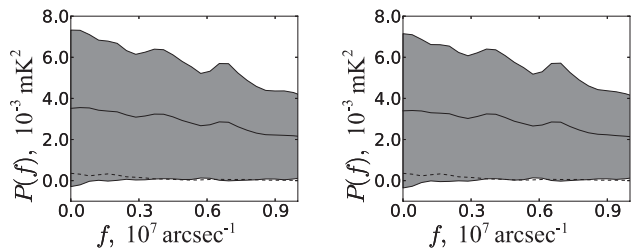
**Рис. 13.** Слева направо: примеры спектров мощности одномерных сечений для некоторых значений космологических параметров (соответственно  $\Omega_b = 0.0462$ ,  $\Omega_\Lambda = 0.735$  и  $n_s = 0.96$ ) при всех остальных параметрах, взятых из модели  $\Lambda$ CDM. Спектры построены для первичных моделей (без выполнения процедуры разделения компонент). Сплошной линией отмечено среднее значение по ста случайным реализациям, серый фон отображает  $1\sigma$ -разброс, обусловленный случайными вариациями, пунктир соответствует данным карты ILC WMAP.

энергии соответствует изменению расстояния до сферы последнего рассеяния и, как следствие, положению первого пика. При этом вариации амплитуды низкочастотной компоненты будут не очень существенны, что и проявляется в спектрах мощности одномерных сечений.

Модели более чувствительны при вариации  $n_s$ . Как и в предыдущем случае, здесь имеется максимум (который растет вместе с ростом  $n_s$ ) на малых частотах и спад к большим. Но при  $n_s \sim 2$  спектры мощности сечения карты ILC оказываются вне области  $1\sigma$ . На Рис. 14 приведены спектры для  $n_s = 3.024$ . Из него видно, что нижняя граница  $1\sigma$  области лежит в области около 0, а  $\sigma$  имеет большие значения (и растет с ростом  $n_s$ ), поэтому за границу  $3\sigma$  спектр мощности сечения карты ILC не выйдет.

Все сказанное выше можно отнести как к спектрам до выделения сигнала, так и после этой операции, с той лишь разницей, что после выделения средние значения немного больше ( $\sim 10\%$ ) на первых нескольких десятках отсчетов.

На Рис. 15 приведены нормированные к соответствующим значениям данных ILC Фурье-спектры для параметров  $\Omega_b = 0.0462$ ,  $\Omega_\Lambda = 0.735$  и  $n_s = 0.96$ . На графиках можно увидеть пики у ряда гармоник, обусловленных слабостью сигнала

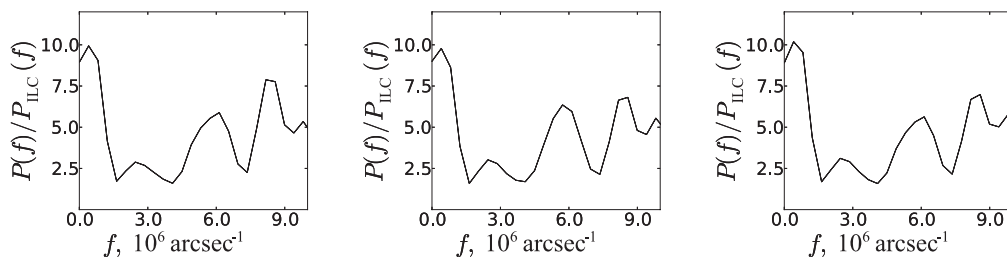


**Рис. 14.** Модель  $n_s = 3.024$ . Спектр мощности сечения ILC-карты лежит вне области  $1\sigma$ . Слева модель соответствует случаю после выделения сигнала, справа — до. Видно, что рисунки практически полностью идентичны, но есть небольшие различия.

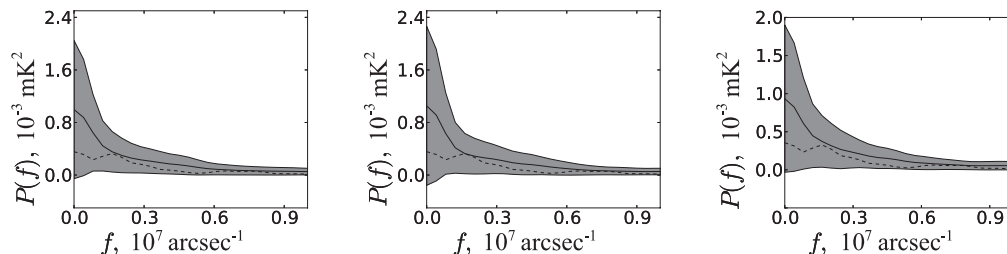
в спектре ILC в соответствующем диапазоне пространственных частот. Аналогичные характеристики были рассчитаны для спектров Фурье после моделирования процедуры разделения компонент для данных каналов  $Q$  и  $V$ . Соответствующие результаты показаны на Рис. 16 и Рис. 17.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

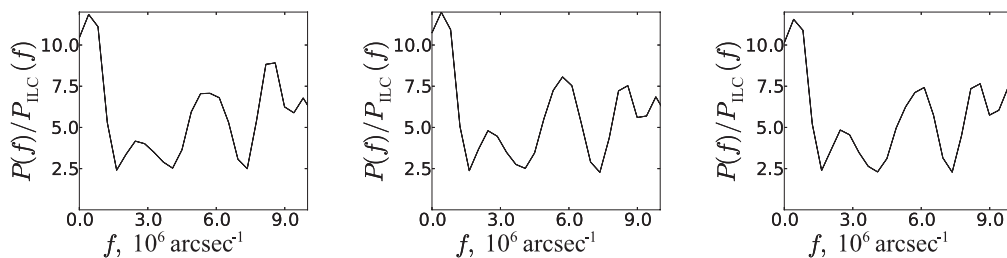
В данной работе мы исследовали возможное влияние метода разделения компонент на чувствительность спектра мощности одномерных сечений к вариациям космологических параметров на низких



**Рис. 15.** Слева направо: средние спектры мощности для данных Рис. 16, нормированные на соответствующие величины спектров ILC-карты для параметров  $\Omega_b = 0.0462$ ,  $\Omega_\Lambda = 0.735$  и  $n_s = 0.96$  соответственно.



**Рис. 16.** Слева направо: примеры спектров мощности одномерных сечений для некоторых значений космологических параметров (соответственно  $\Omega_b = 0.0462$ ,  $\Omega_\Lambda = 0.735$  и  $n_s = 0.96$ ) при всех остальных параметрах, взятых из модели  $\Lambda$ CDM. Спектры построены после выполнения процедуры добавления сигнал от Галактики и разделения компонент. Сплошной линией отмечено среднее значение по ста случайным реализациям, серый фон отображает  $1\sigma$ -разброс, обусловленный случайными вариациями, пунктир соответствует данным карты ILC WMAP.



**Рис. 17.** Слева направо: средние спектры мощности для данных Рис. 16, нормированные на соответствующие величины спектров ILC-карты для параметров  $\Omega_b = 0.0462$ ,  $\Omega_\Lambda = 0.735$  и  $n_s = 0.96$  соответственно. Отношение рассчитано для спектров, построенных после процедуры разделения компонент.

$\ell \leq 100$  гармониках. На такой чувствительности сказывается много факторов. К ним относятся и стабильность методов восстановления, и размер и положение исследуемой области относительно плоскости Галактики, и число пикселей, участвующих в процедуре разделения сигнала для заданного спектрального индекса компонент излучения. Нестабильность разделения компонент ранее уже обсуждалась в работах [25–27]. Эффекты неправильного восстановления гармоник особенно сильны в зонах сильного мешающего сигнала, как это и происходит в плоскости Галактики. В этом случае удобнее просто использовать области вне плоскости Галактики. Тем не менее, выбор зоны на склонении  $\delta = 41^\circ$  позволил авторам [16] исследовать интересные свойства спектрального индекса

синхротронного излучения на малых угловых масштабах. В данной работе мы не стали выделять исключительно малые масштабы, тем самым избежав влияния диаграммы направленности антенны, имеющей сложное распределение [28, 29], на форму спектра мощности одномерных сечений.

Несмотря на проблемы с чувствительностью одномерных сечений карт, содержащих низкие гармоники, к вариациям космологических параметров, можно, тем не менее, отметить, что существует ряд статистических задач, в которых результаты измерений одномерных обзоров и полученные ограничения на уровень сигнала окажутся полезными в космологических исследованиях.

Так, в работах [14, 16] с использованием многочастотных данных РАТАН-600 показано, что



на малых масштабах ( $\ell > 300$ ) имеются вариации спектрального индекса синхротронного излучения, наблюдаемые в одномерных обзорах и не соответствующие стандартным шаблонным картам. Эффект требует более сложной модели мешающих галактических компонент на минутных масштабах. Хотя в данной работе мы исследовали низкие гармоники, недоступные из-за диаграммной модуляции, применяемой на РАТАН-600, тем не менее ожидаемое поведение космологического сигнала на низких пространственных частотах в одномерных сечениях позволяет глубже понять проблему анализа данных.

Отметим также, что независимые данные, представленные в виде одномерных сечений, помогут в исследовании ряда проблем, связанных с поиском аномальных зон в реликтовом фоне. Например, обнаружение так называемого Холодного Пятна в данных WMAP на масштабах  $10^\circ$  с аномальной статистикой фонового сигнала привело к новым интересным направлениям исследований в области статистической анизотропии сигнала и негауссовости [6, 30–32]. Как оказалось, Холодное Пятно наблюдается и в дециметровом диапазоне. И здесь чувствительные сантиметровые и дециметровые обзоры приобретают дополнительную значимость для статистических оценок на уровне десятых и сотых долей мЯн. Существование аномалий такого масштаба представляет собой вызов ряду теорий образования галактик и/или понимание фоновых компонент нашей Галактики. В этом плане интересен статистический анализ независимых наблюдений в радиодиапазоне вообще. Данные РАТАН-600 позволяют проверить предлагаемые модели измерением уровня флуктуаций излучения для предсказываемых эффектов.

Другое интересное направление — исследование процессов вторичной ионизации межгалактического газа при красных смещениях  $z \sim 10$ , которое является одной из самых важных проблем современной космологии [33]. Как было показано в работе [33], существенным моментом при наблюдении структур на таких красных смещениях становится кинематический эффект Зельдовича-Сюняева, возникающий при рассеянии реликтового излучения на электронах в изолированном ионизованном облаке, окружающем источник УФ-излучения. Различная зависимость от частоты позволяет разделить кинематический и тепловой эффекты в наблюдениях скоплений галактик. Количество таких облаков может быть достаточно велико — порядка одного на квадратный градус, что по данным РАТАН-600 можно если и не обнаружить, то наложить верхний предел. Отметим, что в отличие от низких гармоник, диапазоны высоких мультиполей ( $\ell > 300$ ) оказываются как раз полезными при данных исследованиях.

Кроме того, Фурье-спектр одномерных сечений может дать дополнительную информацию при поиске симметричных структур, формирующихся в окрестности Солнца и Галактики или являющихся артефактом обработки данных [34]. Независимые наблюдения позволят выбрать правильную гипотезу. Представляет также интерес независимое исследование в одномерных сечениях крупномасштабных структур, расположенных антисимметрично (осесимметрично с изменением знака) относительно галактической плоскости, обнаруженных в обзоре спутником Planck [35] и отмеченных ранее в [36, 37].

В перспективе предлагаемый подход может быть использован и при анализе данных в космическом проекте “Миллиметр”, представленных в виде одномерных сечений, а также в других неполных обзорах неба, данные которых будут открыты для астрономического сообщества.

В следующей работе мы планируем исследовать спектры мощности для выделенных диапазонов мультиполей, которые ограничат влияние низкочастотных компонент, дающих дополнительный сигнал в Фурье-спектре. С появлением же данных миссии Planck [38] в публичном доступе мы применим данную методику к новым наблюдениям.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны С. А. Трушкину за сделанные замечания, позволившие улучшить изложение результатов работы. При анализе карт на сфере и одномерных сечений авторы использовали систему обработки радиоастрономических данных FADPS ([http://sed.sao.ru/~vo/fadps\\_e.html](http://sed.sao.ru/~vo/fadps_e.html)) [39, 40] и пакет GLESP (<http://www.glesp.nbi.dk>) [19, 41]. О. В. Верходанов также благодарит за поддержку Фонд Дмитрия Зимина “Династия”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. L.-Y. Chiang, P. Coles, P. Naselsky, and P. Olesen, *JCAP* **01**, 021 (2007).
2. M. L. Khabibullina, O. V. Verkhodanov, and Yu. N. Parijskij, *Astrophysical Bulletin* **63**, 95 (2008).
3. 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), Vol. II, p. 239.
4. P. Naselsky, I. Novikov, Yu. Parijskij, and P. Tcibulev, *Int. J. Mod. Phys. D* **8**, 581 (1999).
5. H. E. Jørgensen, E. V. Kotok, I. D. Novikov, et al., *Int. J. Mod. Phys. D* **9**, 127 (2000).

6. P. D. Naselsky, P. R. Christensen, P. Coles, et al., *Astrophysical Bulletin* **65**, 101 (2010).
7. D. Novikov and H. Jørgensen, *Astrophys. J.* **471**, 521 (1996).
8. C. L. Bennett, M. Halpern, G. Hinshaw, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **148**, 1 (2003).
9. C. L. Bennett, R. S. Hill, G. Hinshaw, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **148**, 97 (2003).
10. D. N. Spergel, L. Verde, H. V. Peiris, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **148**, 175 (2003).
11. G. Hinshaw, D. N. Spergel, L. Verde, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **170**, 288 (2007).
12. G. Hinshaw, J. L. Weiland, R. S. Hill, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **180**, 225 (2009).
13. N. Jarosik, C. L. Bennett, J. Dunkley, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **192**, 14 (2011).
14. T. A. Semenova, N. N. Bursov, and Yu. N. Parijskij, *Astrophysical Bulletin* **64**, 270 (2009).
15. Yu. N. Parijskij, M. G. Mingaliev, N. A. Nizhel'Skii, et al., *Astrophysical Bulletin* **66**, 424 (2011).
16. V. A. Stolyarov, Yu. N. Parijskij, N. N. Bursov, et al. *Astrophysical Bulletin* **67**, 29 (2012).
17. Yu. N. Parijskij, N. N. Bursov, A. B. Berlin, et al., *Gravitation & Cosmology* **10**, 139 (2005).
18. N. N. Bursov, Yu. N. Pariiskii, E. K. Maiorova, et al., *Astron. Rep.* **51**, 197 (2007).
19. A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov, et al., *Int. J. Mod. Phys.* **14**, 275 (2003).
20. A. Lewis, A. Challinor, and A. Lasenby, *Astrophys. J.* **538**, 473 (2000).
21. U. Seljak and M. Zaldarriaga, *Astrophys. J.* **469**, 437 (1996).
22. O. V. Verkhodanov, A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, et al., *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **58**, 40 (2005).
23. A. G. Doroshkevich and O. V. Verkhodanov, *Phys. Rev. D* **83**, 3002 (2011).
24. E. Komatsu, K. M. Smith, J. Dunkley, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **192**, 18 (2011).
25. P. D. Naselsky and O. V. Verkhodanov, *Astrophysical Bulletin* **62**, 203 (2007).
26. P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov, and M. T. B. Nielsen, *Astrophysical Bulletin* **63**, 216 (2007).
27. C. J. Copi, D. Huterer, D. J. Schwarz, and G. D. Starkman, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **418**, 505 (2011).
28. E. K. Majorova, *Astrophysical Bulletin* **65**, 196 (2010).
29. E. K. Majorova, *Astrophysical Bulletin* **66**, 90 (2011).
30. M. Cruz, E. Martinez-Gonzalez, P. Vielva, and L. Cayon, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **356**, 29 (2005).
31. M. Hansen, W. Zhao, A. M. Frejsel, et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **426**, 57 (2012), arXiv:1202.1711.
32. O. B. Верходанов, *УФН* **182**, 1177 (2012).
33. A. G. Doroshkevich and S. V. Pilipenko, *Astron. Rep.* **55**, 567 (2011).
34. V. S. Berkutov, Ya. V. Naiden, and O. V. Verkhodanov, *Astrophysical Bulletin* **65**, 187 (2010).
35. Planck Collab., *Astronom. and Astrophys.* (submitted); arXiv:1301.5839.
36. O. V. Verkhodanov and Ya. V. Naiden, *Astrophysical Bulletin* **67**, 1 (2012).
37. O. V. Verkhodanov, T. V. Keshelava, and Ya. V. Naiden, *Astrophysical Bulletin* **67**, 245 (2012).
38. J. A. Tauber, N. Mandolesi, J.-L. Puget, et al., *Astronom. and Astrophys.* **520**, A1 (2010).
39. O. V. Verkhodanov, *ASP Conf. Ser.* **125**, 46 (1997).
40. O. V. Verkhodanov, B. L. Erukhimov, M. L. Monosov, et al., *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **36**, 132 (1993).
41. A. G. Doroshkevich, O. B. Verkhodanov, P. D. Naselsky, et al., *Intern. J. Mod. Phys.* **20**, 1053 (2011).

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

Ya. V. Naiden, O. V. Verkhodanov

We examine the effect given by the variation of the parameters of the cosmological model on the power spectrum of one-dimensional cross sections of the cosmic microwave background maps. We also investigate the possibility of determining these parameters in the analysis of the one-dimensional data. The features of the component separation procedure, leading to additional restrictions on the accuracy of reconstruction of the original spectrum are discussed. When the low harmonics remain in the map, the power spectrum of the one-dimensional cross section is poorly sensitive to the variations of a number of cosmological parameters. Still, the analysis of one-dimensional data could be useful in the search and study of anomalous effects.

Keywords: *cosmology; cosmic background radiation*