

УДК 524.7-732

ЗАГАДКИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ GRB НА СФЕРЕ

© 2010 О. В. Верховданов*, В. В. Соколов, М. Л. Хабибуллина, С. В. Карпов

Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 25 февраля 2010 г.; принята в печать 21 апреля 2010 г.

В работе исследуется случайность распределения на небе положения космических гамма-всплесков. Так как эти события связаны с массивными галактиками, спиральными либо эллиптическими, то их положение должно отслеживать крупномасштабную структуру, что, в свою очередь, могло бы найти отражение в распределении флуктуаций микроволнового фона (СМВ) на сфере. Мы проверяем данную гипотезу корреляционным мозаичным картографированием распределений СМВ пиков и положения всплесков, обнаруживаем корреляцию между распределениями этих сигналов и интерпретируем её как возможный систематический эффект.

Ключевые слова: *гамма-всплески*

1. ВВЕДЕНИЕ

Появление сравнительно больших каталогов гамма-всплесков в результате обзоров космических миссий, таких как итало-голландского спутника BeppoSAX¹ (Satellite per Astronomia X, “Beppo” в честь Giuseppe Occhialini) [1] и комptonовской обсерватории NASA, на которой был проведен эксперимент BATSE² (Burst and Transient Source Experiment) [2], позволило перейти к исследованию свойств пространственного распределения гамма-всплесков, которые в первом приближении распределены равномерно по небесной сфере.

Среди работ последнего времени отметим рассмотрение возможной связи распределения гамма-всплесков из каталога BATSE с крупномасштабной структурой [3]. Авторы работы рассматривают эффект, возникающий при влиянии локальной крупномасштабной структуры на видимое положение гамма-всплесков в результате слабого линзирования, который может проявиться для далеких ($z > 4$) событий. В этом случае может наблюдаться антикорреляция положений гамма-всплесков и галактик скоплений. Авторы статей о гамма-всплесках, используя измерения оптических величин и положений галактик с помощью АРМ (Automatic Plate Measuring Facility), сообщают об обнаружении такой антикорреляции для галактик на $z \sim 0.2 - 0.3$.

В другой работе [4] распределение всплесков из каталога BATSE исследуется различными

методами (с помощью диаграмм Вороного — Voronoi tessalations, дерева минимальных расстояний — minimum spannig tree, мультифрактального спектра — multifractal spectrum). Авторы разделяют список объектов на подвыборки источников с различной длительностью сигнала ($t < 2$ сек, $2 < t < 10$ сек, $t > 10$ сек) и исследуют каждую подвыборку упомянутыми методами. Для первых двух групп они обнаруживают отклонения от однородности при сравнении с модельными данными. Основываясь на полученных данных, авторы [4] обсуждают состоятельность космологического принципа.

В нашем исследовании использовались каталоги BeppoSAX (диапазон энергий: 0.1–200 кэВ, 781 источник) и BATSE (20 кэВ — 2 МэВ, 2037 источников), взятые с родных сайтов экспериментов. Мы разделили каждый каталог на две подвыборки, содержащие, соответственно, короткие (продолжительностью $t < 2$ сек) и длинные ($t > 2$ сек) события. Таким образом мы получили 4 подвыборки источников, которые были исследованы отдельно, но одним и тем же образом. На Рис. 1 показано положение всех гамма-всплесков каталогов BeppoSAX и BATSE. На Рис. 2 — положение коротких и длинных гамма-всплесков каталогов BeppoSAX и BATSE на отдельных картах неба.

В данной статье мы рассматриваем статистические корреляционные свойства распределения гамма-всплесков на небе по отношению к космическому микроволновому фону (СМВ). Исходным пунктом рассуждений является предполагаемая связь гамма-всплесков с массивными спиральными (длинные всплески) либо эллиптическими (короткие всплески) галактиками, а их расположение,

*E-mail: vo@sao.ru

¹<http://www.asdc.asi.it/bepposax/>²<http://www.batse.msfc.nasa.gov/batse/>

соответственно, с крупномасштабной структурой. Тогда можно надеяться обнаружить отклонения в распределении флуктуаций микроволнового фона в проекции на сферу областей всплесков. Отметим, что крупномасштабная структура может быть отражена в флуктуациях СМВ посредством эффекта Зельдовича–Сюняева, проявляющегося через взаимодействие фотонов СМВ с горячими электронами скоплений [5] и наблюдаемого на масштабах порядка $4'$ и меньших, а также посредством интегрального эффекта Сакса–Вольфа [6] при движении квантов в гравитационном поле с переменным потенциалом, возникающем при формировании крупномасштабной структуры и расширении Вселенной, ожидаемом на видимых масштабах более $200'$.

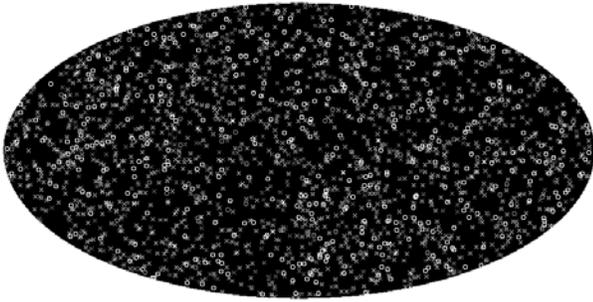


Рис. 1. Распределение гамма-всплесков на небесной сфере. Серым цветом (кружки короткие — всплески, крестики — длинные) показаны данные ВерроSAX, белым — BATSE.

Для исследования корреляционных свойств положений гамма-всплесков и пиков СМВ мы используем карту микроволнового фона, полученную в результате проводимого уже в течение семи лет на спутнике WMAP³ (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) эксперимента по накоплению сигнала со всей небесной сферы [7]. Для восстановления сигнала СМВ из многочастотных наблюдений в этой работе применялся метод внутренней линейной комбинации (ILC — Internal Linear Combination) фоновых компонент [8], в результате которого была получена карта реликтового излучения, также называемая картой ILC и используемая для анализа низких гармоник с номерами мультиполей $\ell \leq 150$. Для построения карты ILC использовались наблюдения в пяти каналах: 23 ГГц (полоса K), 33 ГГц (полоса Ka), 41 ГГц (полоса Q), 61 ГГц (полоса V) и 94 ГГц (полоса W).

Обращая внимание, что одна из центральных проблем статистического исследования гамма-всплесков — большие боксы ошибок при определении координат источников, порядка $1^\circ \times 1^\circ$,

и во избежание неопределенности при анализе распределения событий по небу мы работаем с пикселями размером такого же порядка или больше.

Применяемые в данной статье методы и результаты изложены следующим образом. Сначала описываются способы пикселизации карт распределения всплесков и метод корреляции карт. Далее проводится исследование статистики отклонений СМВ в области гамма-всплесков. На следующем этапе сравниваются корреляционные карты данных BATSE с данными ВерроSAX и СМВ. Результаты обсуждаются в последнем разделе.

2. МЕТОД МОЗАИЧНОЙ КОРРЕЛЯЦИИ

При исследовании свойств карт на различных угловых масштабах используется разложение распределенного на сфере сигнала по сферическим гармоникам (мультиполям):

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

Здесь $\Delta S(\theta, \phi)$ — вариации сигнала на сфере в полярных координатах, ℓ — номер мультиполя, m — номер моды мультиполя. Сферические гармоники определяются как

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

$$x = \cos \theta,$$

где $P_{\ell}^m(x)$ — присоединенные полиномы Лежандра. Для непрерывной функции $\Delta S(x, \phi)$ коэффициенты разложения $a_{\ell m}$ выражаются как

$$a_{\ell m} = \int_{-1}^1 dx \int_0^{2\pi} \Delta S(x, \phi) Y_{\ell m}^*(x, \phi) d\phi, \quad (3)$$

где $Y_{\ell m}^*$ обозначает комплексное сопряжение $Y_{\ell m}$.

Корреляционные свойства двух карт распределения сигнала на сфере на заданных масштабах описываются корреляционным коэффициентом для соответствующего мультиполя ℓ как

$$K(\ell) = \frac{1}{2} \frac{\sum_{m=-\ell}^{\ell} t_{\ell m} s_{\ell m}^* + t_{\ell m}^* s_{\ell m}}{(\sum_{m=-\ell}^{\ell} |t_{\ell m}|^2 \sum_{m=-\ell}^{\ell} |s_{\ell m}|^2)^{1/2}}, \quad (4)$$

где $t_{\ell m}$ и $s_{\ell m}$ — это вариации двух сигналов в гармоническом представлении. Величина коэффициента $K(\ell)$ позволяет проверить корреляцию гармоник на сфере, т.е. сравнить свойства карт в заданном угловом масштабе. Однако при поиске

³<http://lambda.gsfc.nasa.gov>

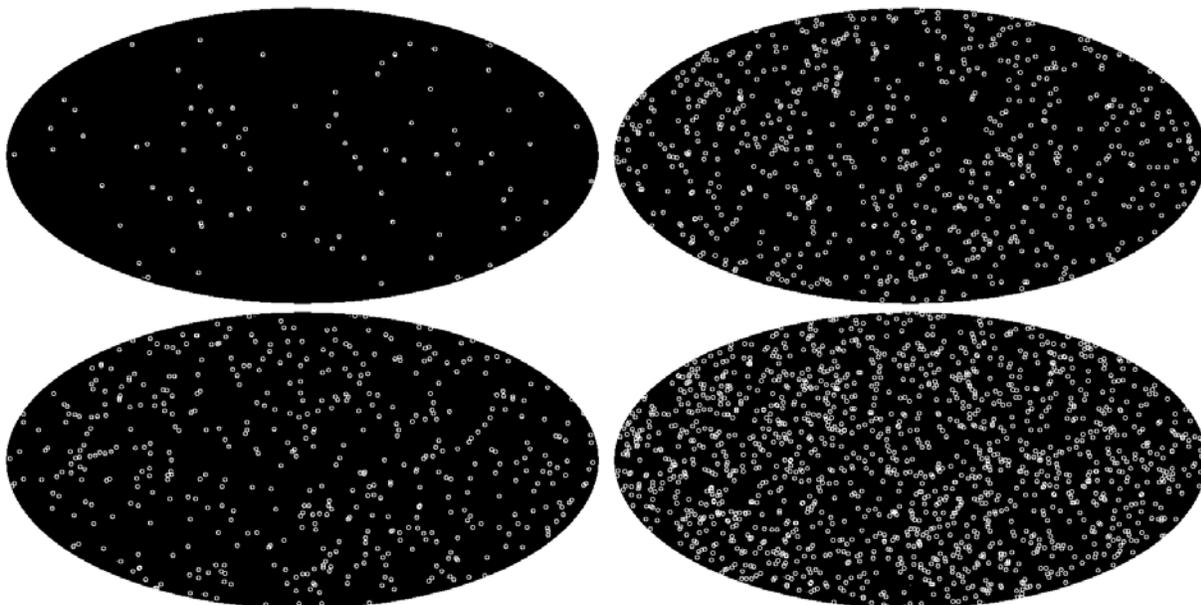


Рис. 2. Распределение подвыборок каталогов гамма-всплесков на небесной сфере. Левый верхний рисунок — данные ВерроSAX, $t < 2$ сек. Правый верхний рисунок — данные ВерроSAX, $t > 2$ сек. Левый нижний рисунок — данные BATSE, $t < 2$ сек. Правый нижний рисунок — данные BATSE, $t > 2$ сек.

скоррелированных областей, не повторяющихся в других областях сферы, этот подход замазывает такие одиночные площадки при общем осреднении по сфере внутри одной гармоники. В этом случае выделить скоррелированные области уже практически не удается.

В работе [9] был предложен подход, реализованный во второй версии пакета GLESP [10] (утилита `difmap`), позволяющий обнаружить корреляции на исследуемых площадках определенного углового размера для двух карт. В этом методе каждому пикселу с номером p , стягивающему телесный угол Ξ_p , ставится в соответствие величина коэффициента кросс-корреляции данных обеих карт на подлежащей площадке. Таким образом, для двух сигналов T и S строится карта корреляций, у которой каждый пиксел p ($p = 1, 2, \dots, N_0$, и N_0 — полное число пикселов на сфере) с углом Ξ_p , вычисляемый для карт на сфере с исходным разрешением, определяемым ℓ_{max} , есть

$$K(\Xi_p | \ell_{max}) = \frac{\sum_{p_{ij} \in \Xi_p} (T(\theta_i, \phi_j) - \overline{T(\Xi_p)})(S(\theta_i, \phi_j) - \overline{S(\Xi_p)})}{\sigma_{T_p} \sigma_{S_p}} \quad (5)$$

Здесь $T(\theta_i, \phi_j)$ — величина сигнала T в пикселе с координатами (θ_i, ϕ_j) для исходного разрешения пикселизации сферы, $S(\theta_i, \phi_j)$ — величина другого сигнала на такой же площадке, $\overline{T(\Xi_p)}$ и $\overline{S(\Xi_p)}$ — средние значения в площадке Ξ_p , полученные по

данным карт с более высоким разрешением, задаваемым ℓ_{max} , σ_{T_p} , и σ_{S_p} — соответствующие стандарты на этой площадке.

3. СТАТИСТИКА СИГНАЛА СМВ В ОБЛАСТИ ГАММА-ВСПЛЕСКОВ

Первым способом проверки статистических свойств распределения положений всплесков и сигнала СМВ был простейший анализ измерений значений пикселов в картах СМВ. Измерения в пикселах проведены процедурой `marcut` пакета GLESP. На Рис. 3 и 4 показано положение всплесков из подвыборок каталогов ВерроSAX и BATSE на картах СМВ с разрешением $260'$ ($\ell_{max} = 20$) и $36'$ ($\ell_{max} = 150$). Разрешение карт было выбрано в соответствии с ожидаемым масштабом проявления эффекта Сакса-Вольфа и предельным разрешением миссии WMAP.

Для поиска возможных корреляций мы подсчитали количество попаданий всплесков в пиксели СМВ, имеющие отрицательные значения флуктуаций сигнала, возможно обусловленного описанными выше эффектами, на картах микроволнового фона с различным разрешением. В Таблице приведена статистика значений пикселов СМВ в областях гамма-всплесков для подвыборок каталогов BATSE и ВерроSAX для коротких и длинных событий. В неё включены полное количество источников в подвыборках, количество источников, которые находятся в пикселах СМВ с отрицательным значением флуктуаций, а также ожидаемое

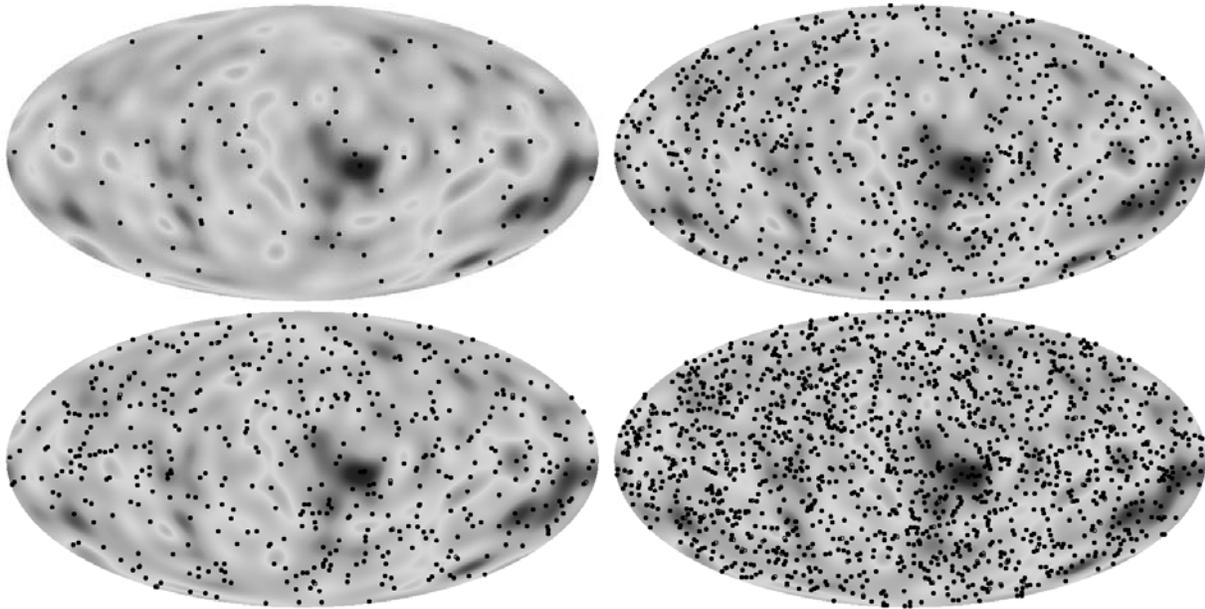


Рис. 3. Положение гамма-всплесков из разных подвыборок на картах СМВ с разрешением $\ell_{max} = 20$. Левый верхний рисунок — данные ВерроSAX, $t < 2$ сек. Правый верхний рисунок — данные ВерроSAX, $t > 2$ сек. Левый нижний рисунок — данные BATSE, $t < 2$ сек. Правый нижний рисунок — данные BATSE, $t > 2$ сек.

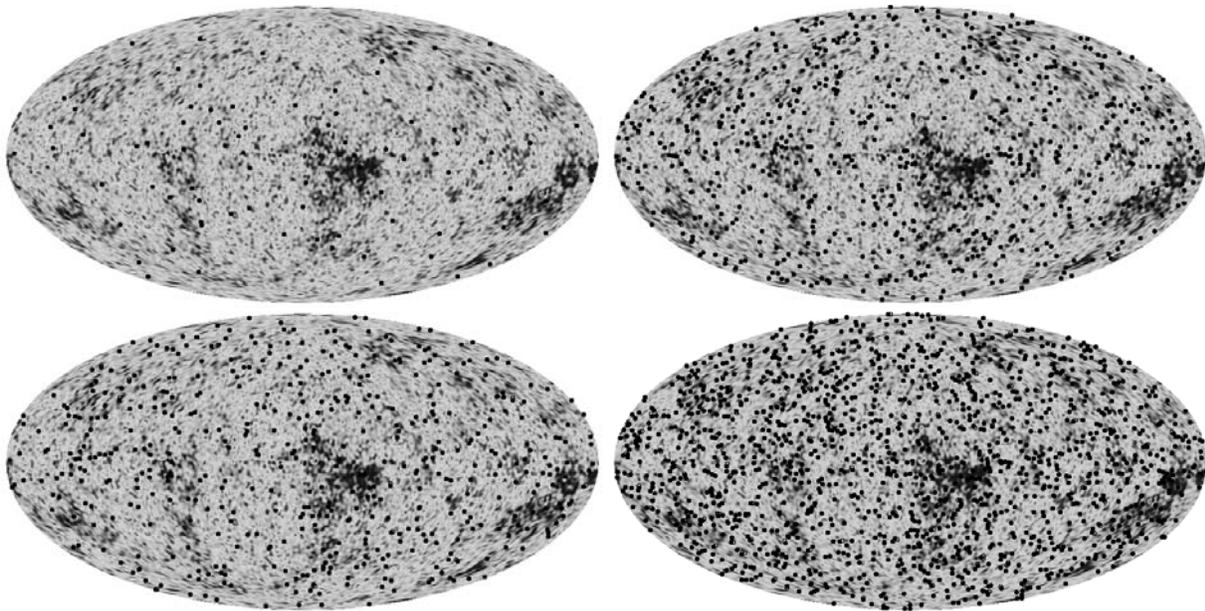


Рис. 4. Положение гамма-всплесков из разных подвыборок на картах СМВ с разрешением $\ell_{max} = 150$. Левый верхний рисунок — данные ВерроSAX, $t < 2$ сек. Правый верхний рисунок — данные ВерроSAX, $t > 2$ сек. Левый нижний рисунок — данные BATSE, $t < 2$ сек. Правый нижний рисунок — данные BATSE, $t > 2$ сек.

количество пикселей с отрицательным значением амплитуды СМВ по модельным данным 200 реализаций случайного гауссова сигнала СМВ в Λ CDM космологии и 1σ -разброс этих значений.

На Рис. 5 и 6 мы приводим диаграммы распределения величины флуктуаций СМВ для четырех подвыборок всплесков и двух карт СМВ с

различным разрешением. Пунктирными линиями показан ожидаемый 1σ -разброс значений СМВ в Λ CDM космологической модели. Привлекает внимание левый нижний график на Рис. 6, где показано распределение величины флуктуаций на карте СМВ с разрешением $\ell_{max} = 150$ в областях коротких гамма-всплесков каталога BATSE. В обла-

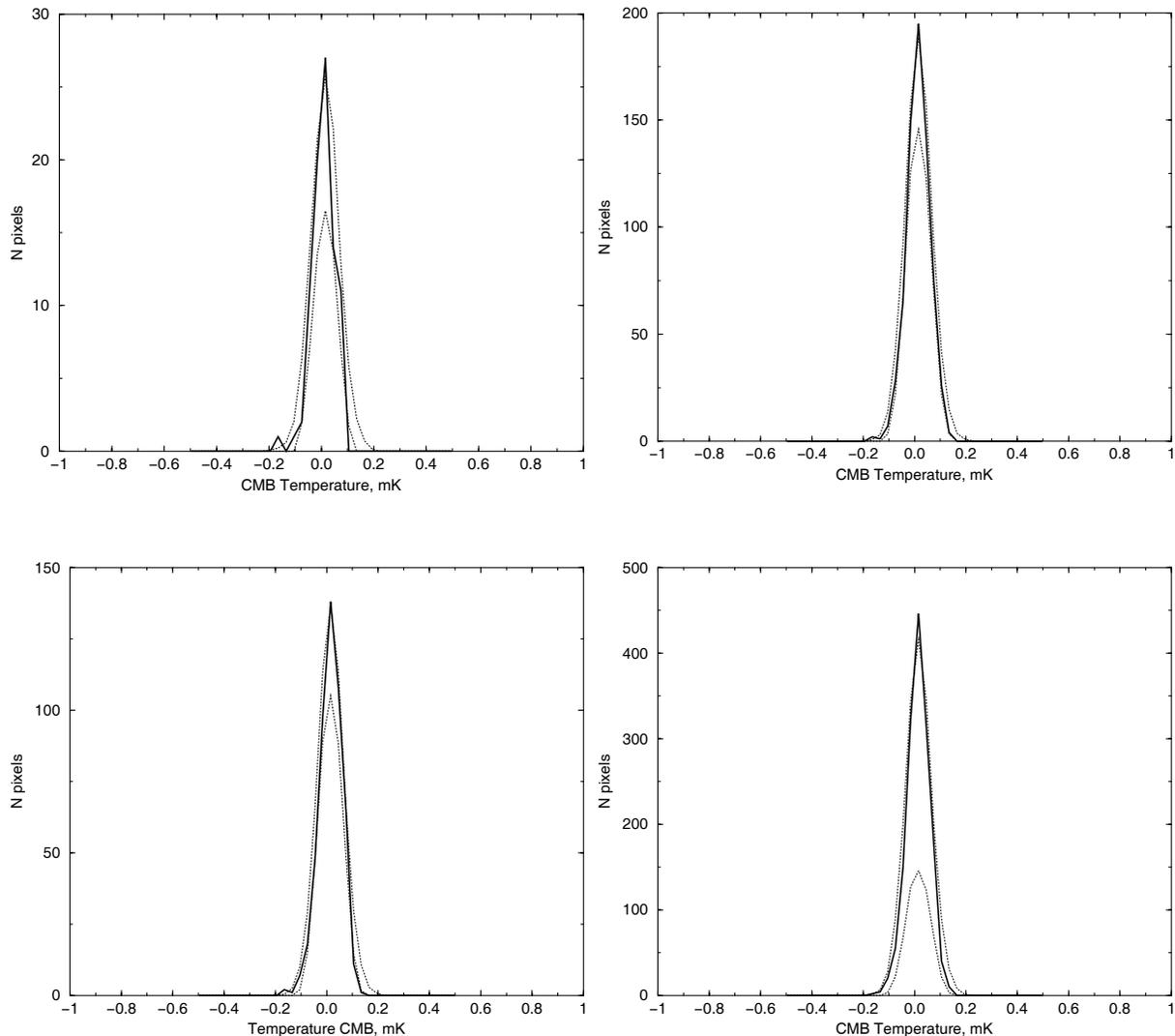


Рис. 5. Распределение значений флуктуаций СМВ в пикселях WMAP, соответствующих положению гамма-всплесков, с разрешением карт $l_{max} = 150$ для разных подвыборок гамма-всплесков. Левый верхний рисунок — данные ВерроSAX, $t < 2$ сек. Правый верхний рисунок — данные ВерроSAX, $t > 2$ сек. Левый нижний рисунок — данные BATSE, $t < 2$ сек. Правый нижний рисунок — данные BATSE, $t > 2$ сек. Пунктирными линиями показан 1σ -разброс значений СМВ в Λ CDM космологической модели.

сти положительных значений графика имеется пик, приводящий к отклонению от гауссовости диаграммы. Положение этих всплесков, наложенное на квадруполь СМВ, показано на Рис. 7. Уровень значимости этой особенности, оценка которого была проведена посредством моделирования 10000 случайных реализаций СМВ со спектром мощности, соответствующим Λ CDM модели, равен 7×10^{-4} .

Для анализа распределения положений гамма-всплесков, соответствующих избыточному пику, мы провели пикселизацию карты положений всплесков с помощью программного пакета GLESP [10]. Размер пикселя $700' \times 700'$ выбран таким, чтобы максимальное значение пикселя —

число событий в соответствующей ему области — было не меньше трех, и обеспечивался значимый динамический диапазон для гармонического анализа. Пикселизованная таким способом карта выбранных всплесков показана на Рис. 8. Изображение демонстрирует явно неравномерное распределение событий на сфере, сконцентрированное у эклиптических и/или экваториальных полюсов, что наиболее хорошо видно на сглаженной карте (Рис. 9). На Рис. 9 также нанесены сетки эклиптической и экваториальной систем координат, и видно, что имеется асимметрия сигнала в мощности относительно экваториальной плоскости и в количестве пятен, концентрирующихся в южном

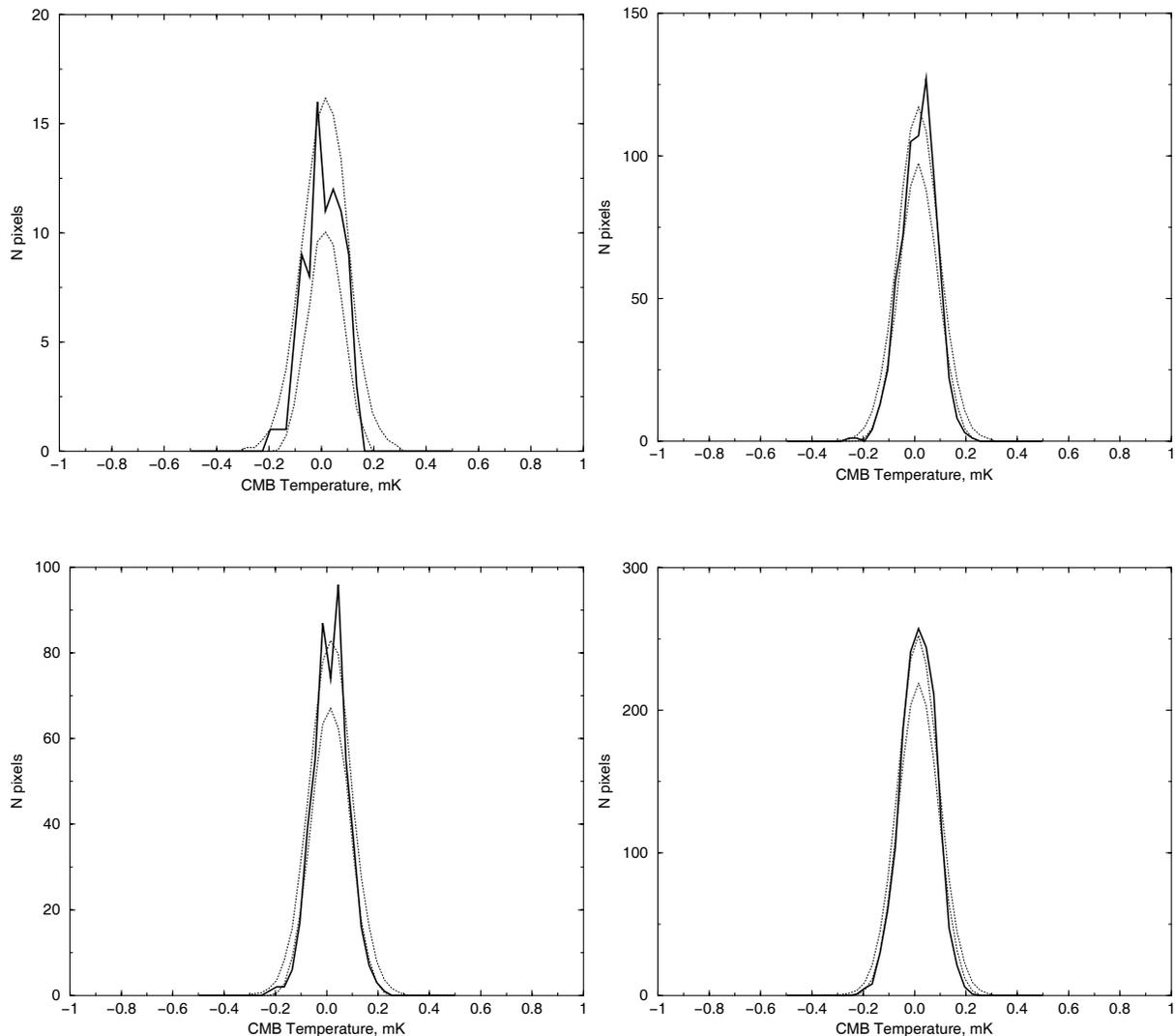


Рис. 6. Распределение значений флуктуаций СМВ в пикселях WMAP, соответствующих положению гамма-всплесков, с разрешением карт $\ell_{max} = 150$ для разных подвыборок гамма-всплесков. Левый верхний рисунок — данные BeppoSAX, $t < 2$ сек. Правый верхний рисунок — данные BeppoSAX, $t > 2$ сек. Левый нижний рисунок — данные BATSE, $t < 2$ сек. Правый нижний рисунок — данные BATSE, $t > 2$ сек. Пунктирными линиями показан 1σ -разброс значений СМВ в Λ CDM космологической модели.

полушарии в обеих системах координат. Отметим также, что горячее пятно над галактическим центром лежит в экваториальной плоскости.

Для более явной демонстрации симметрий построим квадруполь сглаженной карты (Рис. 10) и таким же образом как на Рис. 9 наложим сетки эклиптической и экваториальной систем координат. Из положений пятен квадруполя видно, что полюса обеих координатных систем находятся на окраине горячих пятен, холодные пятна находятся симметрично относительно экваториальных плоскостей, галактический центр попадает в седловидную область между холодными и горячими пятнами.

Исследование свойств положений гамма-

всплесков из области пика в распределении коротких всплесков каталога BATSE по отношению к СМВ показало неожиданную чувствительность к локальным (околоземным) системам координат. Для более детального исследования этой проблемы проведем пикселизацию всех четырех подвыборок каталогов гамма-всплесков методом мозаичной корреляции, описанной в предыдущем разделе.

4. КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ КАРТЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГАММА-ВСПЛЕСКОВ И WMAP ILC

Для проверки и уточнения корреляционных свойств карт положений гамма-всплесков и

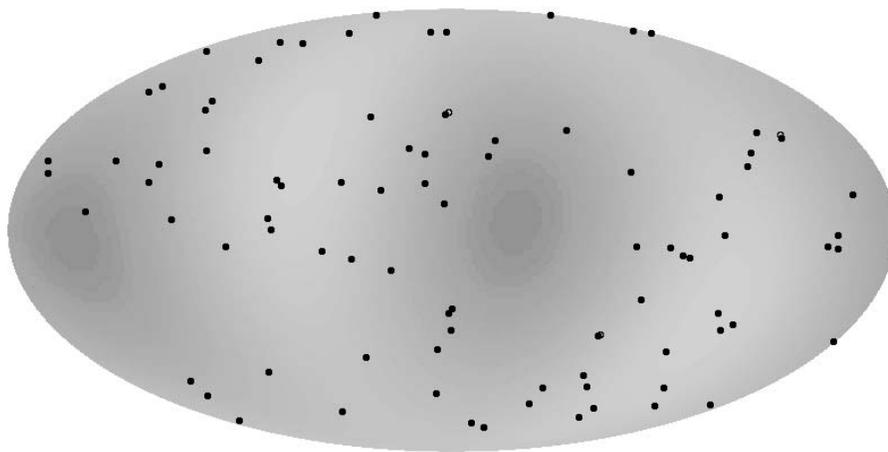


Рис. 7. Положение коротких всплесков из каталога BATSE, соответствующих избытку на гистограмме Рис. 6 (левый нижний график), на карте квадрупольной компоненты ILC.

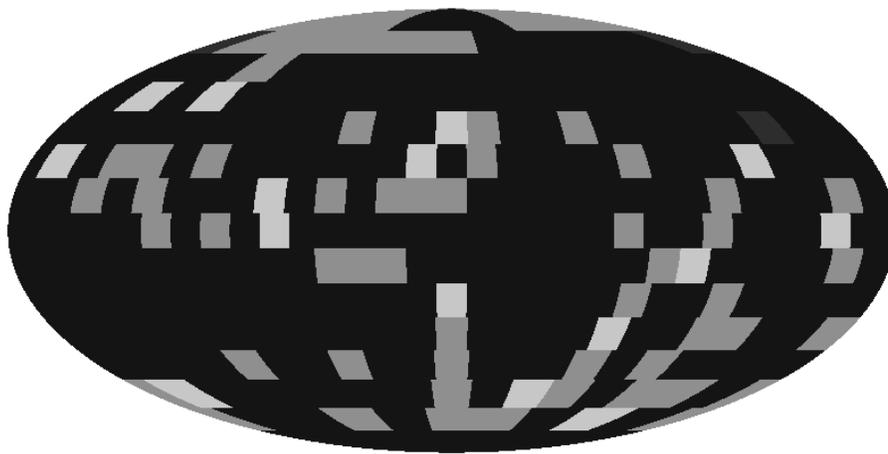


Рис. 8. Пикселизованная карта положений коротких гамма-всплесков из каталога BATSE, соответствующих избытку гистограммы на Рис. 6 (левый нижний график). Размер пиксела $700' \times 700'$ выбран таким образом, чтобы максимальное значение в пикселе — число событий в соответствующей области неба — было не меньше трех.

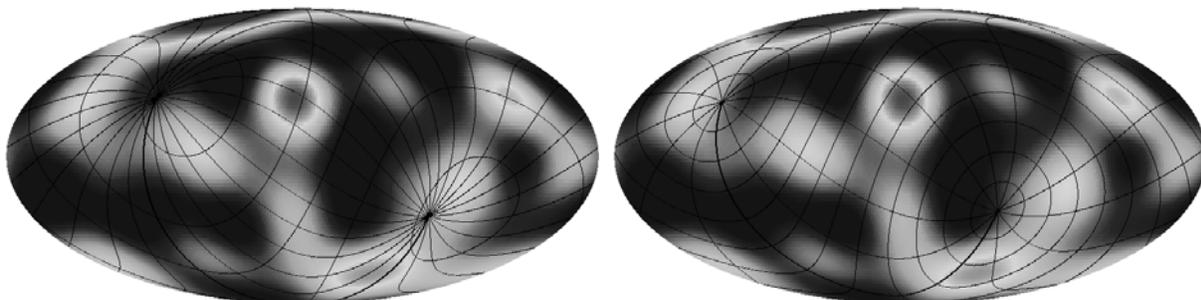


Рис. 9. Сглаженная карта неба, соответствующая пикселизации на Рис. 8, с наложенными на неё координатными сетками: эклиптической (справа) и экваториальной (слева).

флуктуаций микроволнового фона мы провели пикселизацию карт положений гамма-всплесков четырех подвыборок гамма-всплесков (Рис. 11). Размер пиксела $200' \times 200'$ ($l_{max} = 26$) был выбран, как и на предыдущем этапе, таким, чтобы

его максимальное значение — число событий в соответствующей ему площадке — было не меньше трех.

Далее мы провели мозаичную корреляцию карт для пар “BATSE — ВерроSAX” и “BATSE —

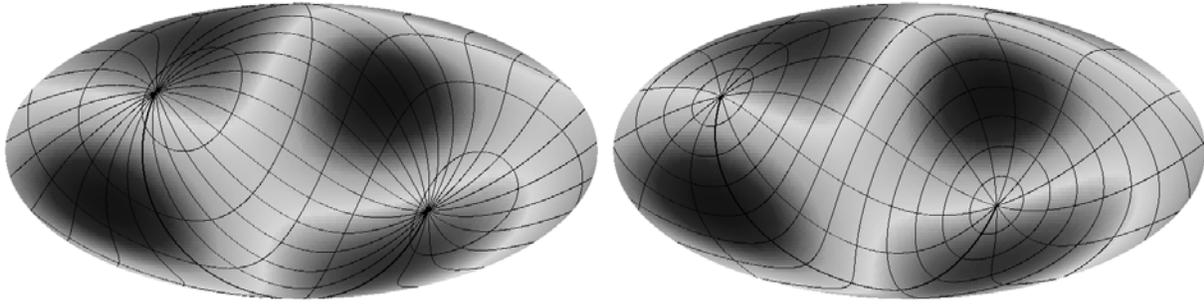


Рис. 10. Квадруполь сглаженной карты (Рис. 9) с наложенными на него координатными сетками: эклиптической (справа) и экваториальной (слева).

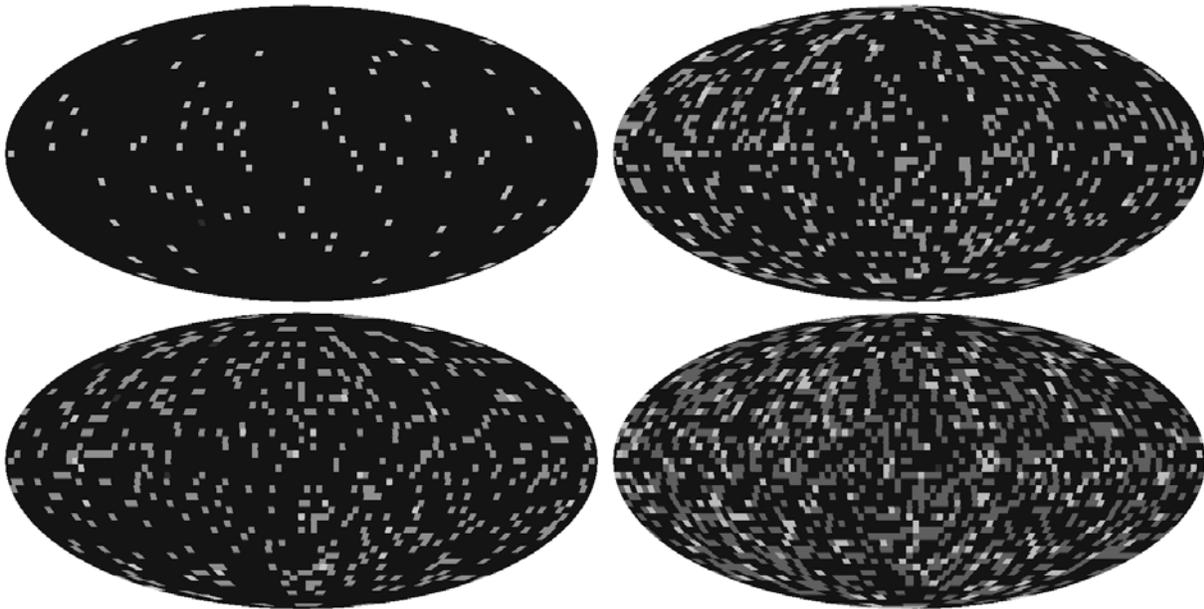


Рис. 11. Пикселизованные карты положений подвыборок гамма-всплесков. Размер пикселя $200' \times 200'$. Левый верхний рисунок — данные ВерроSAX, $t < 2$ сек. Правый верхний рисунок — данные ВерроSAX, $t > 2$ сек. Левый нижний рисунок — данные BATSE, $t < 2$ сек. Правый нижний рисунок — данные BATSE, $t > 2$ сек.

СМВ” (Рис. 12). Размер пиксела корреляций составил $500' \times 500'$.

Используя разложение по формуле (1), можно рассчитать угловой спектр мощности карты:

$$C(\ell) = \frac{1}{2\ell + 1} \left[|a_{\ell 0}|^2 + 2 \sum_{m=1}^{\ell} |a_{\ell, m}|^2 \right]. \quad (6)$$

Спектр мощности позволяет выделить основные гармоники, дающие вклад в корреляционную карту. На Рис. 13 мы приводим спектры мощности карт корреляционных коэффициентов для данных BATSE мозаичной корреляцией с данными СМВ ($\ell_{max} = 26$) и положениями гамма-всплесков ВерроSAX.

Обращают на себя внимание три графика спектров мощности карт корреляций: между положением коротких всплесков BATSE и ВерроSAX

(Рис. 13, левый верхний график), а также коротких и длинных всплесков BATSE и флуктуаций СМВ (Рис. 13, соответственно правые верхний и нижний графики), в пиках которых имеются особенности, формально выходящие за уровень 2σ , а гармоники $\ell=1,4,7,9$ — и за 3σ . Для оценки значимости этих отклонений было проведено численное моделирование нулевой гипотезы — сгенерированы 10000 случайных реализаций совокупности положений гамма-всплесков каталога ВерроSAX на небесной сфере в предположении их равномерного распределения, а также случайные карты СМВ с соответствующим Λ CDM космологии гауссовым распределением амплитуд, и для них проведен расчет корреляций и соответствующих спектров мощности аналогично сделанному для реальных данных. Вероятности достижения уровней наблюдаемых на Рис. 13 осо-

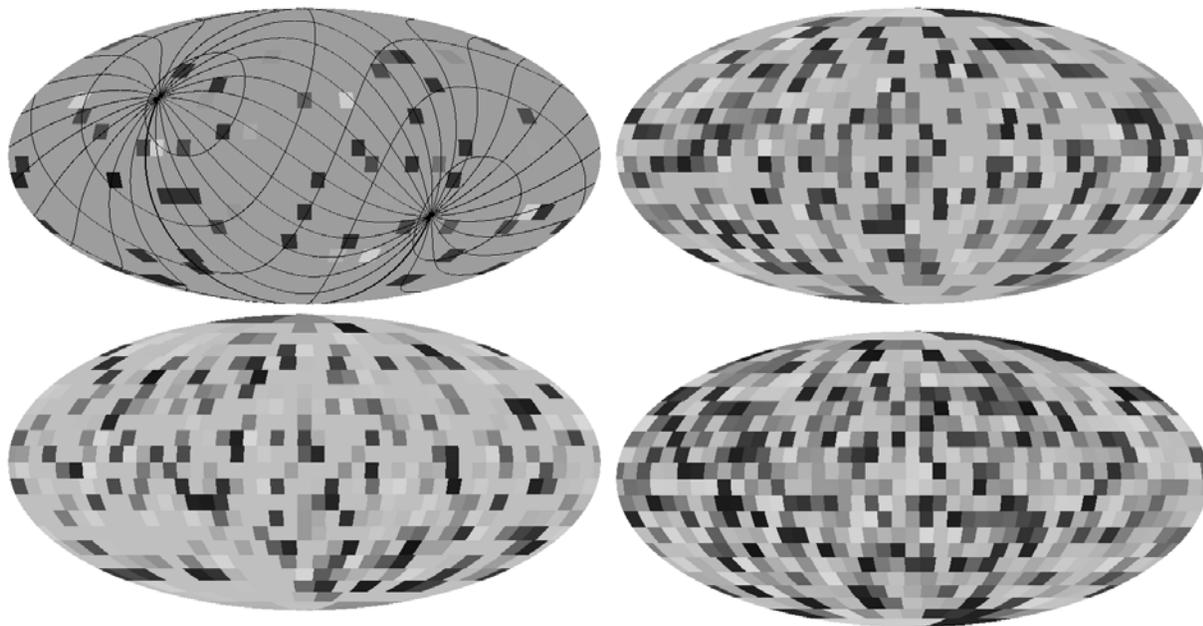


Рис. 12. Корреляционные карты данных СМВ ($\ell_{max} = 26$) и положений гамма-всплесков в галактической системе координат. Размер пиксела корреляций — $500' \times 500'$. Левый верхний рисунок — корреляция данных BATSE и ВерроSAX, $t < 2$ сек, с наложенной сеткой эклиптической системы координат. Правый верхний рисунок — корреляция данных BATSE ($t < 2$ сек) и СМВ. Левый нижний рисунок — корреляция данных BATSE и ВерроSAX, $t > 2$ сек. Правый нижний рисунок — корреляция данных BATSE ($t > 2$ сек) и СМВ.

бенностей в рамках нулевой гипотезы — уровни значимости пиков спектра мощности — показаны на Рис. 14. Для мультиполей $\ell=1, 4, 7, 9$ карты корреляций коротких всплесков BATSE и ВерроSAX они составляют соответственно 0.0011, 0.0012, 0.0001 и меньше 0.0001, тогда как для октуполя корреляций длинных всплесков BATSE и ВерроSAX — 0.0325, а для квадруполя карты корреляций длинных всплесков BATSE и флуктуаций СМВ — 0.0614. Карта одной из гармоник ($\ell = 7$) в распределении корреляционных коэффициентов положений коротких всплесков BATSE и ВерроSAX показана на Рис. 15. Карты пиковых гармоник ($\ell = 3$ для коротких и $\ell = 2$ для длинных всплесков) спектра корреляционных карт BATSE и СМВ приведены на Рис. 16.

Особенностью приведенных карт с наложенными координатными сетками является положение полюсов координатных систем. На Рис. 15 видно, что полюса эклиптической системы координат находятся в особых точках — седлах между максимумами и минимумами в распределении сигнала на карте. Аналогично, в седлах располагаются и полюса в экваториальной системе на карте октуполя корреляций (Рис. 16, сверху). На правой карте (квадруполе) Рис. 16 видно, что полюса лежат в минимумах квадруполя. Мы оценили значимость такой конфигурации — вероятность попадания минимумов квадруполя в области радиусом 5 градусов вокруг экваториальных полюсов — описанным

выше способом для 10000 случайных реализаций для пикселизации GLESP с 102 пикселями на экваторе, и нашли её равной 0.0035.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенный анализ корреляций карт положений гамма-всплесков и СМВ свидетельствует, что такие корреляции существуют. Вызывает большой интерес ориентация (фазовые характеристики) карт корреляций, в распределении которых можно выделить два момента: (1) для корреляций положений коротких гамма-всплесков разных каталогов, а также их корреляций с СМВ обнаруживаемые особенности (положение полюсов) наблюдаются как в экваториальной, так и в эклиптической системах координат; кроме того, несмотря на малое количество коротких событий ВерроSAX и BATSE, корреляций их положений в окне $500' \times 500'$ демонстрирует цепочку событий в эклиптической плоскости (Рис. 12, левый верхний), а также преимущественное попадание скоррелированных пикселей в южное эклиптическое полушарие; (2) корреляции длинных событий BATSE и флуктуаций СМВ имеют особенности в экваториальной системе координат, причем совместная вероятность высокой амплитуды квадруполя и попадания его минимума в экваториальный полюс при корреляции со случайными картами практически равна нулю.

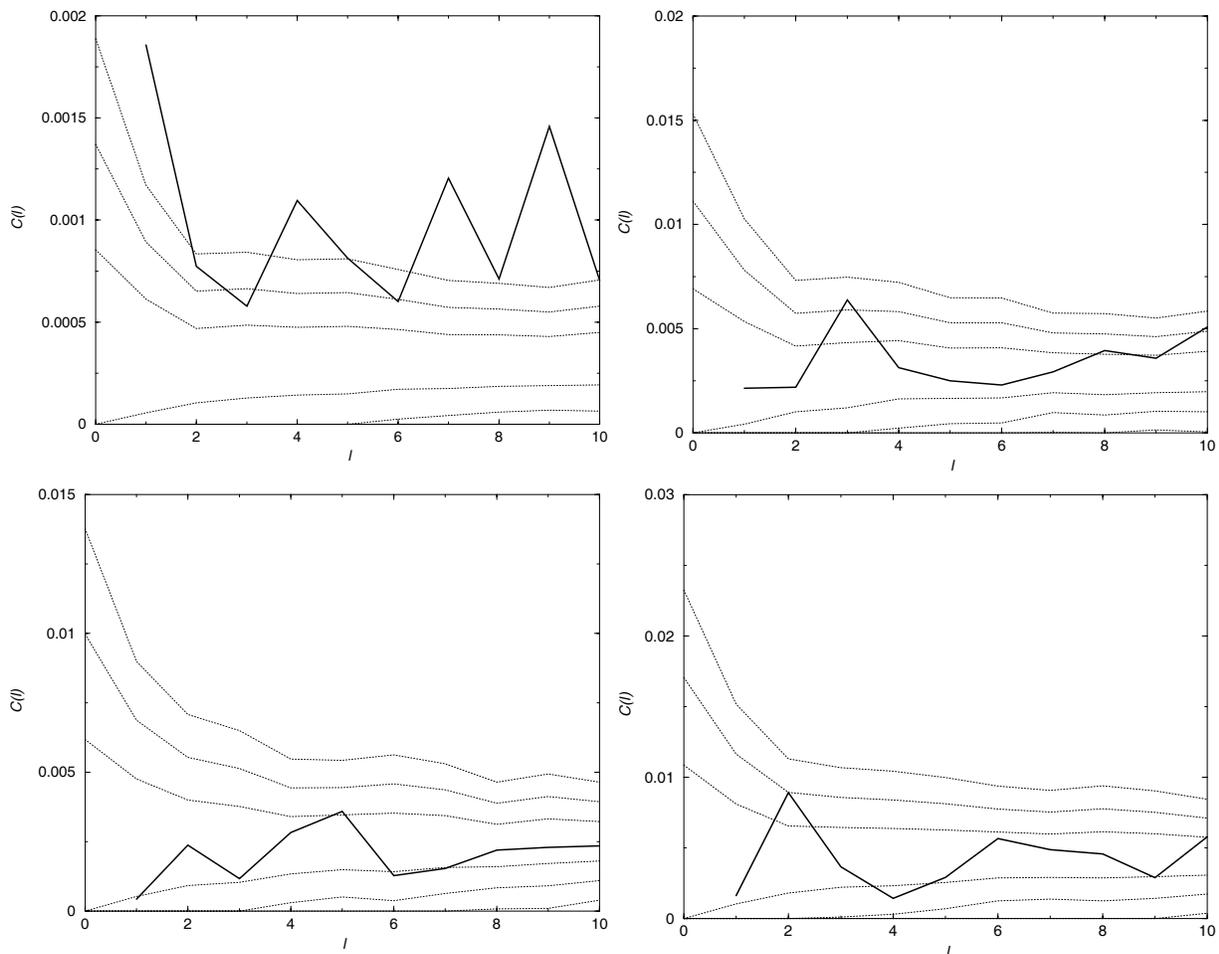


Рис. 13. Спектры мощности карт корреляционных коэффициентов между положениями гамма-всплесков BATSE с данными ВерроSAX и СМВ ($\ell_{max} = 26$) (сплошная линия). Размер пиксела корреляций $500' \times 500'$. Левый верхний рисунок — спектр корреляции данных BATSE и ВерроSAX, $t < 2$ сек. Правый верхний рисунок — спектр корреляции данных BATSE ($t < 2$ сек) и СМВ. Левый нижний рисунок — спектр корреляции данных BATSE и ВерроSAX, $t > 2$ сек. Правый нижний рисунок — спектр корреляции данных BATSE ($t > 2$ сек) и СМВ. Пунктирные линии соответствуют уровням отклонений от среднего в $\pm\sigma$, $\pm 2\sigma$ и $\pm 3\sigma$, где σ оценивалась по спектрам 200 случайных реализаций нулевой гипотезы, состоящей в равномерном распределении всплесков на небесной сфере, а также в соответствующем Λ CDM-космологии гауссовском распределении амплитуд для СМВ.

Обнаруженные корреляции между положением гамма-всплесков и СМВ, чувствительные к экваториальной системе координат, скорее всего связаны с систематическими эффектами. Так, большее число гамма-событий вблизи экваториальных полюсов может быть связано с большим интегральным временем экспозиции камер спутников в силу их метода наблюдений — оба спутника, наблюдавших гамма-всплески, обращались по достаточно низким околоземным орбитам, что приводило к систематическому экранированию областей вблизи небесного экватора. В то же время, для данных СМВ такую чувствительность к экваториальной системе в рамках подобной простой модели объяснить не удастся, т.к. данные микроволнового фона получены на спутнике WMAP, обращающемся вокруг точки Лагранжа L2. Отметим, что в преды-

дущей работе [11] мы также получили корреляции, “знающие” о существовании экваториальной системы. Мы не исключаем здесь возможного вклада магнитного поля Земли, имеющего большую протяженность и проявляющегося в крупномасштабных корреляциях микроволнового фона. Однако механизм таких корреляций нам не ясен.

Непонятна также возможная взаимосвязь плоскости эклиптики и положений гамма-всплесков. Здесь ситуация обратная: эклиптические особенности в данных СМВ в последнее время уже обсуждались [11–13], но чтобы понять, что может связывать гамма-события и эклиптическую плоскость, потребуются дополнительные исследования. Одна из возможных гипотез — селекционный эффект, связанный с разворотом аппаратуры

Таблица. Статистика значений пикселей СМВ в областях гамма-всплесков для подвыборок каталогов BATSE и ВерроSAX. В колонках соответственно: t — длительность (сек); миссия; разрешение карты СМВ (номер мультиполя), полное количество источников гамма-излучения в подвыборке (N_t); количество источников (N_e), которые находятся в пикселях СМВ с отрицательным значением флуктуаций; ожидаемое количество пикселей с отрицательным значением амплитуды СМВ по данным 200 реализаций случайного гауссова сигнала в Λ CDM космологии и 1σ -разброс этих значений.

t , сек	Миссия	ℓ_{max}	N_t	N_e	Модель
<2	BATSE	150	497	244	249±11
>2	BATSE	150	1540	763	769±19
<2	BATSE	20	497	250	248±13
>2	BATSE	20	1540	781	768±32
<2	ВерроSAX	150	87	43	44±5
>2	ВерроSAX	150	694	339	347±15
<2	ВерроSAX	20	87	50	44±5
>2	ВерроSAX	20	694	346	348±18

спутников от Солнца и тем самым с выделением эклиптической плоскости.

Отметим также, что корреляционные свойства СМВ, проявляющиеся в “околоземных” системах координат, при использовании данных “случайно” распределенных событий говорят о негауссовости данных СМВ в области низких мультиполей, обусловленных либо систематикой, либо неизученным эффектом в околоземном пространстве. Продолжение исследования этой корреляции нам кажется особенно интересным в связи с ожиданием появления новых качественных данных миссий Fermi и Planck.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают признательность Валерию Ларионову (СПбГУ) за полезные дискуссии при осуждении результатов данной работы. Мы благодарим NASA за возможность использования архива (NASA Legacy Archive), откуда были взяты данные WMAP. Мы также признательны авторам пакета HEALPix⁴ [14], с помощью которого были преобразованы карты WMAP7 в коэффициенты $a_{\ell m}$. В работе использован пакет GLESP⁵ [15, 16] для дальнейшего анализа данных

⁴<http://www.eso.org/science/healpix/>

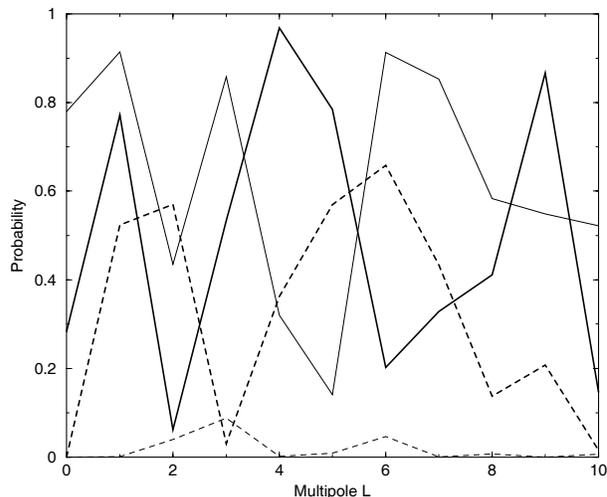


Рис. 14. Уровни значимости отклонений от среднего для спектров мощностей карт корреляций положений коротких гамма-всплесков BATSE-ВерроSAX (тонкая штриховая линия), длинных всплесков BATSE-ВерроSAX (толстая штриховая линия), коротких всплесков BATSE и флуктуаций СМВ (тонкая сплошная линия) и длинных всплесков BATSE и флуктуаций СМВ (толстая сплошная линия). Значимость оценивалась посредством прямого численного эксперимента с 10000 случайных реализаций нулевой гипотезы, принимающей равномерное распределение всплесков на небесной сфере, а также в соответствующем Λ CDM-космологии гауссовом распределении амплитуд для СМВ.

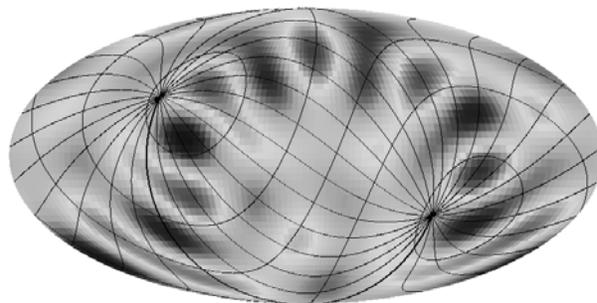


Рис. 15. Карта седьмой гармоники ($\ell = 7$) в разложении карты корреляций положений коротких всплесков BATSE и ВерроSAX с наложенной сеткой экваториальной системы координат.

СМВ на сфере. Данная работа была поддержана грантом “Ведущие научные школы России” (школа С. Э. Хайкина) и грантами РФФИ № 09-02-00298 и № 08-02-00486. О.В.В. благодарит также за частичную поддержку Фонд Содействия Отечественной Науке (программа “Молодые доктора РАН”) и Фонд “Династия”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. D. Riccia, F. Fioreb, and P. Giommia, Nuclear Physics B - Proc. Suppl. **69**, 618 (1999).

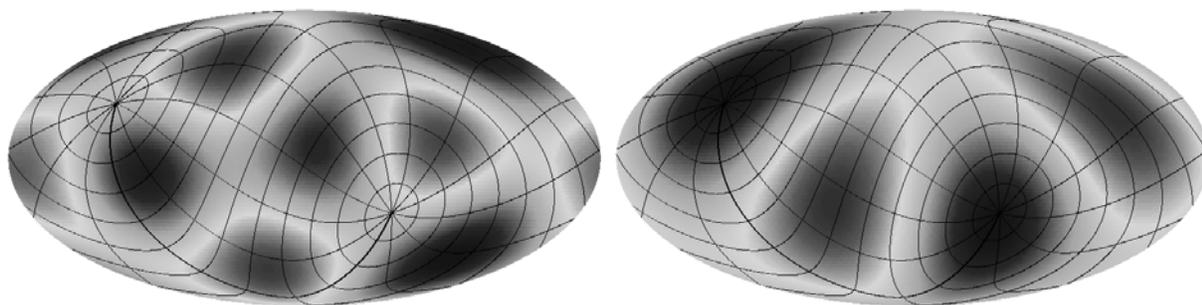


Рис. 16. Карты выделенных гармоник в спектре мощности (Рис. 13). Карты корреляций положения всплесков BATSE ($t > 2$ сек) с данными ВерроSAX (верхний рисунок, $\ell = 3$) и CMB (нижний рисунок, $\ell = 2$). На карты наложена сетка экваториальной системы координат.

2. W. S. Paciesas, C. A. Meegan, G. N. Pendleton, et al. *Astrophys. J. Suppl.* **122**, 465 (1999), astro-ph/9903205.
3. L. L. R. Williams and N. Frey, *Astrophys. J.* **583**, 594 (2003).
4. A. Mészáros, L. G. Balázs, Z. Bagoly, and P. Veres, arXiv:0906.4034
5. Ya. B. Zeldovich and R. A. Sunyaev. *Astrophys. Space Sci.* **4**, 301 (1969).
6. R. K. Sachs and A. M. Wolfe, *Astrophys. J.* **147**, 73 (1967).
7. N. Jarosik, C. L. Bennett, J. Dunkley, et al., *Astrophys. J. Suppl.*, submitted (2010), arXiv:1001.4744.
8. C. L. Bennett, M. Halpern, G. Hinshaw, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **148**, 1 (2003), astro-ph/0302207.
9. O. V. Verkhodanov, M. L. Khabibullina, and E. K. Majorova, *Astrophysical Bulletin* **64**, 263 (2009).
10. A. G. Doroshkevich, O. B. Verkhodanov, O. P. Naselsky, et al., arXiv0904.2517 (2009).
11. O. V. Verkhodanov and M. L. Khabibullina, *Astrophysical Bulletin* **65**, accepted (2010).
12. J. M. Diego, M. Cruz, J. Gonzalez-Nuevo, et al., arXiv: 0901.4344 (2009).
13. V. Dikarev, O. Preuss, S. Solanki, et al., *Astrophys. J.* **705**, 670 (2009).
14. K. Górski, E. Hivon, A. J. Banday, et al., *Astrophys. J.* **622**, 759 (2005).
15. A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov, et al., *Int. J. Mod. Phys. D* **14**, 275 (2003), astro-ph/0305537.
16. O. V. Verkhodanov, A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, et al., *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **58**, 40 (2005).

GRB SKY DISTRIBUTION PUZZLES

O.V. Verkhodanov, V.V. Sokolov, M.L. Khabibullina, S.V. Karpov

We analyze the randomness of the sky distribution of cosmic gamma-ray bursts. These events are associated with massive galaxies, spiral or elliptical, and therefore their positions should trace the large-scale structure, which, in turn, could show up in the sky distribution of fluctuations of the cosmic microwave background (CMB). We test this hypothesis by mosaic correlation mapping of the distributions of CMB peaks and burst positions, find the distribution of these two signals to be correlated, and interpret this correlation as a possible systematic effect. We analyze the randomness of the sky distribution of cosmic gamma-ray bursts. These events are associated with massive galaxies, spiral or elliptical, and therefore their positions should trace the large-scale structure, which, in turn, could show up in the sky distribution of fluctuations of the cosmic microwave background (CMB). We test this hypothesis by mosaic correlation mapping of the distributions of CMB peaks and burst positions, find the distribution of these two signals to be correlated, and interpret this correlation as a possible systematic effect.

Key words: *Stars: gamma-ray burst: general*