

УДК 524.827-732

СТАТИСТИКА СИГНАЛА СМВ ПО ДАННЫМ PLANCK В НАПРАВЛЕНИИ НА ГАММА-ВСПЛЕСКИ ИЗ КАТАЛОГОВ BATSE И ВерроSAX

© 2014 М. Л. Хабибуллина, О. В. Верходанов*, В. В. Соколов

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 27 февраля 2014 года; принята в печать 5 августа 2014 года

В работе исследуется распределение гамма-всплесков из каталогов космических обсерваторий BATSE и ВерроSAX по отношению к данным микроволнового фона космической миссии Planck. Для анализа данных применялись три метода: (1) построение гистограммы значений сигнала СМВ в направлении GRB, (2) расчет мозаичных карт корреляций для положений гамма-всплесков и распределения СМВ, (3) вычисление среднего отклика на карте микроволнового фона в области «среднего популяционного GRB». Обнаружена корреляция положения GRB и флуктуаций СМВ на сфере, что может быть интерпретировано как влияние систематических эффектов в процессе наблюдений. Кроме того, в осредненных площадках карт СМВ обнаружено различие в распределении средних флуктуаций для коротких и длинных гамма-всплесков, что может быть вызвано различной природой этих событий.

Ключевые слова: *реликтовое излучение — гамма-всплески*

1. ВВЕДЕНИЕ

Качество обзоров неба, проводимых в последнее десятилетие в разных диапазонах длин волн, позволяет исследовать распределение материи в наблюдаемой части Вселенной. Кроме прямого измерения параметров распределения галактик и реконструкции крупномасштабной структуры, как это сделано в обзоре SDSS [1], существует множество эффектов, привязка к которым позволяет восстановить распределение материи. Среди них эффекты вторичной анизотропии космического микроволнового фона (СМВ — Cosmic Microwave Background): интегральный эффект Сакса–Вольфа [2], вызванный изменением частоты фотонов СМВ в переменном гравитационном потенциале формирующихся скоплений галактик и преобладающий на масштабах более 10° , эффект Сюняева–Зельдовича [3] на масштабах менее $10'$, возникающий при взаимодействии горячих электронов в скоплении галактик с фотонами СМВ (обратный эффект Комптона), эффекты рассеяния в эпоху реионизации и просто мешающие факторы в виде микроволнового излучения радиосточников и скоплений галактик. Независимым признаком крупномасштабной структуры (Large Scale Structure — LSS) являются и гамма-вспышки,

позволяющие отслеживать распределение вещества на космологических расстояниях.

Наблюдаемое однородное распределение гамма-всплесков в проекции на небесную сферу, как и распределение основной массы радиосточников (за исключением самых слабых, связанных с ближайшими галактиками), является демонстрацией космологического принципа, требующего, чтобы Вселенная была однородной и изотропной независимо от места наблюдателя [4]. Наблюдения показывают, что самые большие структуры имеют размер порядка 400 Мпк [5]. На меньших масштабах, особенно при малых красных смещениях ($z < 0.1$), материя распределена анизотропно и неоднородно. Однако поиск больших структур продолжается и на $z < 1$ (см., например, [6, 7]). Отметим, что интегральные и статистические характеристики распределения СМВ, определяемые по корреляции карт с положениями галактик SDSS, показывают существование выделенных масштабов 2° – 3° в диапазоне красных смещений $z = 0.8$ – 2 , что соответствует линейным масштабам 60 Мпк и может интерпретироваться как максимальный размер ячейки неоднородности [8–12]. Это согласуется с моделью проявления активности радиосточников в диапазоне $z \sim 1$ – 2 [13, 14], где ожидаются вариации гравитационного потенциала в формирующихся скоплениях. В этом плане сравнительное распределение экстремумов карты

*E-mail: vo@sao.ru

СМВ и гамма-всплесков (GRB) на небесной сфере интересно как новый показатель признаков LSS на картах СМВ на разных z . Гамма-всплески в силу равномерности наблюдаемого распределения дают возможность проверить и космологический принцип. Кроме того, имеются предположения об их потенциальном применении в качестве стандартной свечи для оценки расстояний до исследуемых объектов [15, 16]. Существующие сравнительно крупные каталоги — BeppoSAX¹ (Satellite per Astronomia X, «Beppo» — в честь Giuseppe Occhialini) [17] и BATSE² (Burst and Transient Source Experiment) [18], — содержащие такие объекты, позволяют изучать их пространственное распределение.

В предыдущей работе [24] мы изучили статистические корреляционные свойства распределения гамма-всплесков на небе по отношению к космическому микроволновому фону (СМВ) методом корреляционного мозаичного картографирования [26, 27]. В исследовании использовались данные WMAP³ (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) [28], данные итало-голландского спутника BeppoSAX (диапазон энергий: 0.1–200 кэВ, 781 источник) и результаты эксперимента BATSE (20 кэВ–2 МэВ, 2037 источников). Каждый каталог был разделен на две подвыборки, содержащие соответственно короткие (продолжительностью $t < 2$ с) и длинные ($t > 2$ с) события. На рис. 1 показано положение всех гамма-всплесков каталогов BeppoSAX и BATSE. На рис. 2 — положение коротких и длинных гамма-всплесков тех же каталогов.

В последние годы многие авторы разными методами исследовали распределение гамма-всплесков [19–25]. Среди этих исследований можно выделить работу [23], в которой авторы исследовали короткие ($t < 2$ с), средние ($2 < t < 10$ с) и длинные ($t > 10$ с) по продолжительности всплески из каталога BATSE различными методами: с помощью диаграмм Вороного (Voronoi tessellations), дерева минимальных расстояний (minimum spanning tree) или мультифрактального спектра (multifractal spectrum). Для первых двух групп всплесков они обнаружили отклонения от однородности при сравнении с модельными данными. Основываясь на этом, они обсуждают выполнимость космологического принципа. В работе [25] в качестве зондирующих объектов кроме гамма-всплесков использовались положения вспышек сверхновых с $z < 1.4$. Для данных по сверхновым на диаграмме «Температура СМВ в направлении на источник– z »

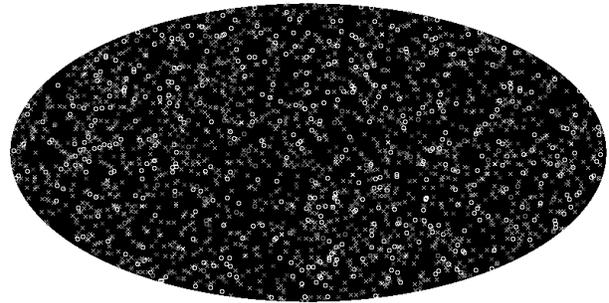


Рис. 1. Распределение гамма-всплесков на небесной сфере. Кружками показаны короткие всплески, крестиками — длинные.

было обнаружено отклонение от равномерного распределения температуры в отличие от подобной диаграммы для гамма-всплесков. Авторы интерпретируют различие вкладом интегрального эффекта Сакса–Вольфа.

В предположении связи гамма-всплесков с массивными спиральными (для длинных всплесков) либо эллиптическими (для коротких всплесков) галактиками, а их расположения — соответственно с крупномасштабной структурой, можно исследовать статистику неоднородностей СМВ, возникающих в результате эффектов вторичной анизотропии. Таким образом, положение GRB может быть связано с особенностями распределения флуктуаций микроволнового фона в тех областях небесной сферы, где всплески были зарегистрированы (например, они могут проявиться в виде отклонения от статистической изотропии СМВ). Так как в большинстве случаев при исследовании гамма-всплесков основной проблемой являются большие боксы ошибок в определении координат источников (порядка $1^\circ \times 1^\circ$), мы работали с картами, сглаженными до 1° . В результате предыдущей работы с данными WMAP была обнаружена корреляция между распределением пиков СМВ и положениями всплесков, что в частности может быть обусловлено эффектами систематики, вызванными методами наблюдений и обработки данных. Обнаруженная корреляция положений гамма-всплесков и распределения СМВ чувствительна к экваториальной системе координат и может быть вызвана, например, попаданием микроволнового излучения Земли в далекие боковые лепестки диаграммы направленности антенны.

Данная работа является продолжением предыдущей [24], где использовались данные архива WMAP [28]. В текущем исследовании мы применили и развили наш подход для данных космиче-

¹<http://www.asdc.asi.it/beppojax/>

²<http://www.batse.msfc.nasa.gov/batse/>

³<http://lambda.gsfc.nasa.gov>

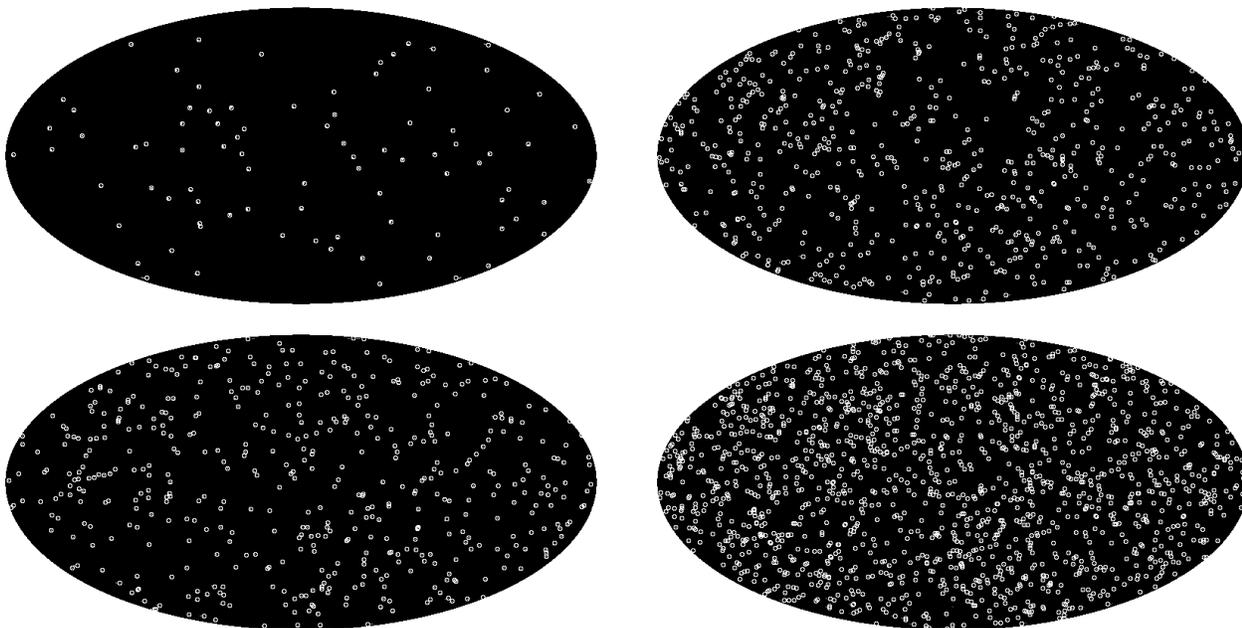


Рис. 2. Распределение подвыборок каталогов гамма-всплесков на небесной сфере. На левом верхнем рисунке показаны данные ВерроSAX, $t < 2$ с. На правом верхнем рисунке — данные ВерроSAX, $t > 2$ с. Левый нижний рисунок демонстрирует данные BATSE, $t < 2$ с. Правый нижний рисунок — данные BATSE, $t > 2$ с.

ской миссии Planck⁴ [29], конкретно: для карты SMICA [30].

Ниже мы применим несколько статистических подходов для исследования распределения гамма-всплесков на сфере. В разделе 2 будет рассмотрена статистика сигнала СМВ в области гамма-всплесков. В разделе 3 мы исследуем мозаичные корреляции карт СМВ (Planck SMICA) и положений GRB. Далее (раздел 4) используем процедуру осреднения (stacking) полей карты СМВ в направлении на гамма-всплески для оценки «среднего популяционного» микроволнового сигнала. В разделе 5 обсудим полученные результаты.

2. СТАТИСТИКА СИГНАЛА СМВ В ОБЛАСТИ ГАММА-ВСПЛЕСКОВ

Карта SMICA [30] реликтового излучения эксперимента Planck восстановлена из много-частотных наблюдательных данных, полученных на высокочастотном комплексе (High Frequency Instrument — HFI) в полосах 100, 143, 217, 353, 545, 857 ГГц и на низкочастотном (Low Frequency Instrument — LFI) в полосах 30, 44, 70 ГГц. Разрешение карты реликтового фона составило приблизительно $5'$. Несмотря на то, что миссия Planck

вторична по отношению к другой космической миссии — WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) NASA, она имеет лучшие наблюдательные характеристики. Среди них можно отметить более высокое разрешение (в 3 раза), давшее возможность измерить угловой спектр мощности до более высоких гармоник (т.е. больших величин ℓ), более высокую чувствительность (в 10 раз) и 9 частотных полос, улучшающих процедуру разделения фоновых компонент. Эти параметры Planck позволили получить новые, фактически независимые (от WMAP) наблюдательные данные. В данной работе мы использовали карту SMICA, сглаженную до $\ell_{\max} = 150$, а также в ряде случаев применяли маску Mask-RulerMinimal_2048_R1 [29].

Для анализа статистики значений пикселей использовалась процедура `mapcut` пакета GLESP⁵ [31]. Расчеты выполнялись для карт, сглаженных до разрешения $260'$ ($\ell_{\max} = 20$), $35'$ ($\ell_{\max} = 150$), $20'$ ($\ell_{\max} = 300$) и $10'$ ($\ell_{\max} = 600$). На рис. 3 и 4 показано положение всплесков из подвыборки каталогов ВерроSAX и BATSE на картах СМВ с разрешением $260'$ ($\ell_{\max} = 20$) и $35'$ ($\ell_{\max} = 150$). Разрешение карт было выбрано в соответствии с ожидаемым масштабом проявления эффекта Сакса–Вольфа и возможными проявлениями особенностей в карте SMICA. На рис. 5 для

⁴http://www.sciops.esa.int/wikiSI/planckpla/index.php?title=Main_Page&instance=Planck_Public_PLA

⁵<http://www.glesp.nbi.dk>

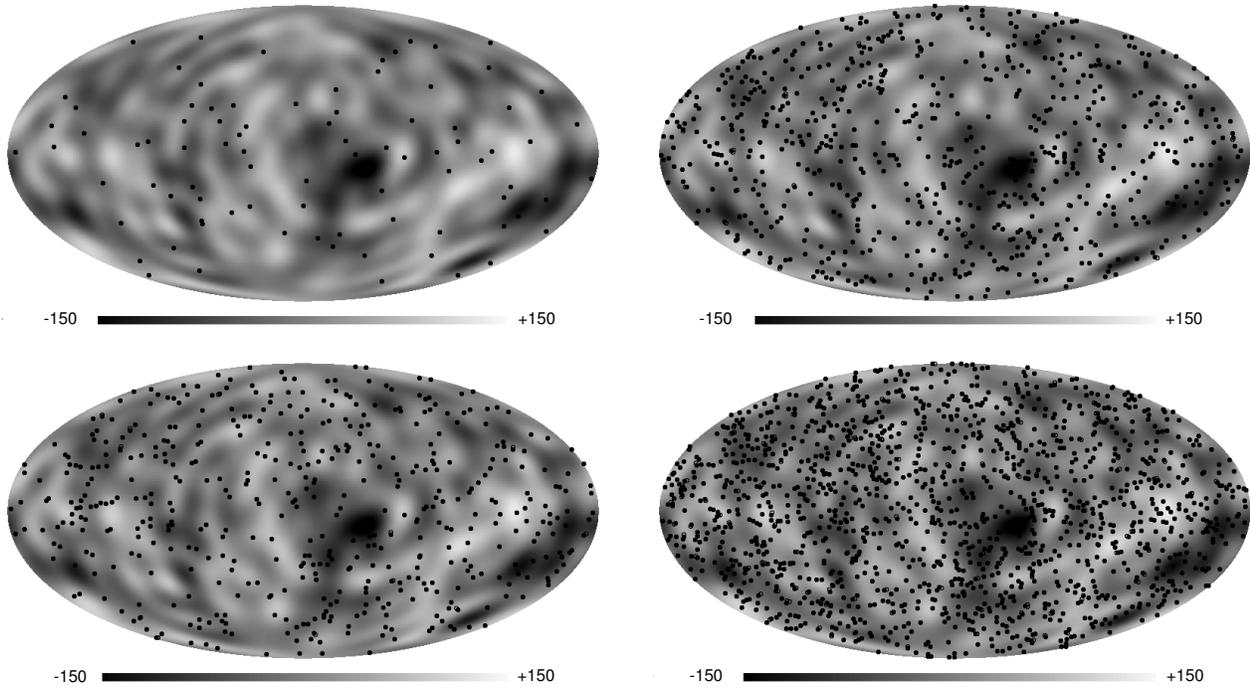


Рис. 3. Положение гамма-всплесков из разных подвыборок на картах СМВ с разрешением $\ell_{\max} = 20$. Расположение панелей — как на рис. 2.

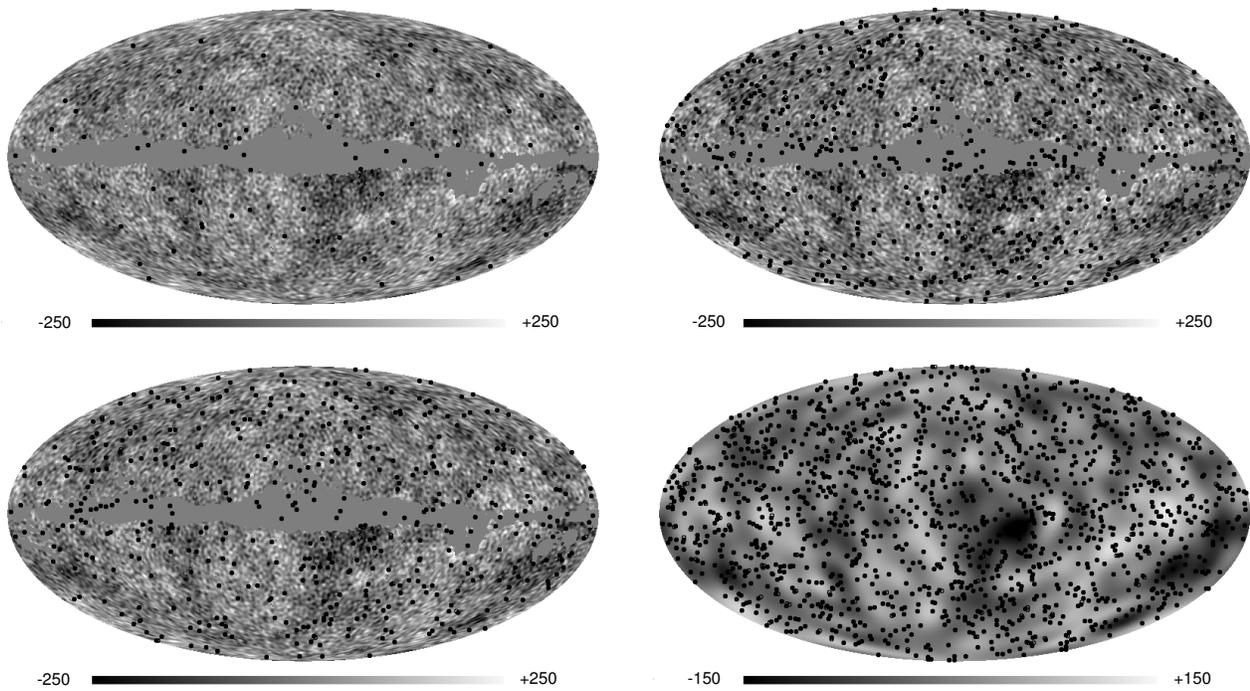


Рис. 4. Положение гамма-всплесков из разных подвыборок на картах СМВ с разрешением $\ell_{\max} = 150$. На карту СМВ наложена маска. Расположение панелей — как на рис. 2.

Статистика значений пикселей СМВ в областях гамма-всплесков для подвыборок каталогов BATSE и ВерроSAX. В колонках соответственно: длительность всплеска (t , секунды); учет маски в данных Planck; 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; разность ΔN между N_e и ожидаемое средним по случайным реализациям; 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 , с	Маска	Миссия	ℓ_{\max}	N_t	N_e	ΔN	Модель
> 2	нет	BATSE	20	1540	781	12	769 ± 32
> 2	да	BATSE	20	1243	632	8	624 ± 33
< 2	нет	BATSE	20	497	247	-1	248 ± 13
< 2	да	BATSE	20	394	184	-16	200 ± 13
> 2	нет	BATSE	150	1540	772	4	768 ± 19
> 2	да	BATSE	150	1242	638	16	622 ± 21
< 2	нет	BATSE	150	497	248	-1	249 ± 11
< 2	да	BATSE	150	403	200	-8	208 ± 11
> 2	да	BATSE	300	1248	655	33	622 ± 21
< 2	да	BATSE	300	409	207	2	205 ± 10
> 2	да	BATSE	600	1244	625	4	621 ± 20
< 2	да	BATSE	600	413	220	12	208 ± 10
> 2	нет	Verposax	20	694	343	-5	348 ± 17
> 2	да	Verposax	20	555	272	-15	287 ± 19
< 2	нет	Verposax	20	87	44	0	44 ± 5
< 2	да	Verposax	20	67	34	1	33 ± 4
> 2	нет	Verposax	150	694	327	-30	347 ± 15
> 2	да	Verposax	150	562	271	-9	280 ± 15
< 2	нет	Verposax	150	87	45	1	44 ± 5
< 2	да	Verposax	150	66	34	1	33 ± 4
> 2	да	Verposax	300	559	279	-3	282 ± 13
< 2	да	Verposax	300	65	32	-1	33 ± 4
> 2	да	Verposax	600	563	266	-15	281 ± 13
< 2	да	Verposax	600	68	34	0	34 ± 4

примера показано положение GRB на карте СМВ в диапазоне мультиполей $20 < \ell \leq 150$.

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 пикселей СМВ в областях гамма-всплесков для подвыборок каталогов BATSE и ВерроSAX для коротких и длинных событий. В ней содержатся следующие параметры: полное количество источников в подвыборках, количество источников, которые попадают в пиксели СМВ с отрицательным значением флуктуаций, а также ожидаемое количество пикселей с отрицательным значением амплитуды СМВ по модельным данным 200 реализаций случайного гауссова сигнала СМВ в космологической модели Λ CDM и 1σ -разброс этих значений. Данные были получены как с учетом маски в данных Planck, так и без нее.

На рис. 6–9 приведены диаграммы распределения величины флуктуаций СМВ для четырех подвыборок всплесков и карт СМВ с различным разрешением. Пунктирными линиями показан ожидаемый 1σ -разброс значений СМВ в Λ CDM-космологической модели. В предыдущей работе [24] было обнаружено отклонение от ожидаемого при случайном гауссовом сигнале СМВ в распределении величины флуктуаций с разрешением $\ell_{\max} = 150$ в областях коротких гамма-всплесков BATSE. В данных Planck также наблюдаются отклонения для коротких всплесков (см. рис. 7 — два верхних графика). Кроме того, имеются небольшие отклонения от моделей для длинных GRB из каталога BATSE и коротких всплесков каталога ВерроSAX на $\ell_{\max} = 20$ (рис. 6 — вторая и третья пара графиков), коротких всплесков каталога ВерроSAX на $\ell_{\max} = 150$ (рис. 7 — третья пара графиков), длинных событий из каталога BATSE на $\ell_{\max} = 300$ (рис. 8 — верхний правый рисунок) и длинных всплесков каталога ВерроSAX на $\ell_{\max} = 600$ (рис. 9 — нижняя правая картинка). Чтобы проанализировать распределение гамма-всплесков, в направлении которых определен отклоняющийся от ожидаемого сигнал, для их распределения на сфере была проведена пикселизация с помощью программного пакета GLESP [31] (процедура `mapcat`). Размер пикселя, равный $700' \times 700'$, выбирался так, чтобы максимальная величина, записанная в пиксел данного размера, т.е. число событий в соответствующей ему области, было не меньше трех, и обеспечивался значимый динамический диапазон для гармонического анализа. Пикселизованные таким способом и сглаженные карты положения всплесков, которые

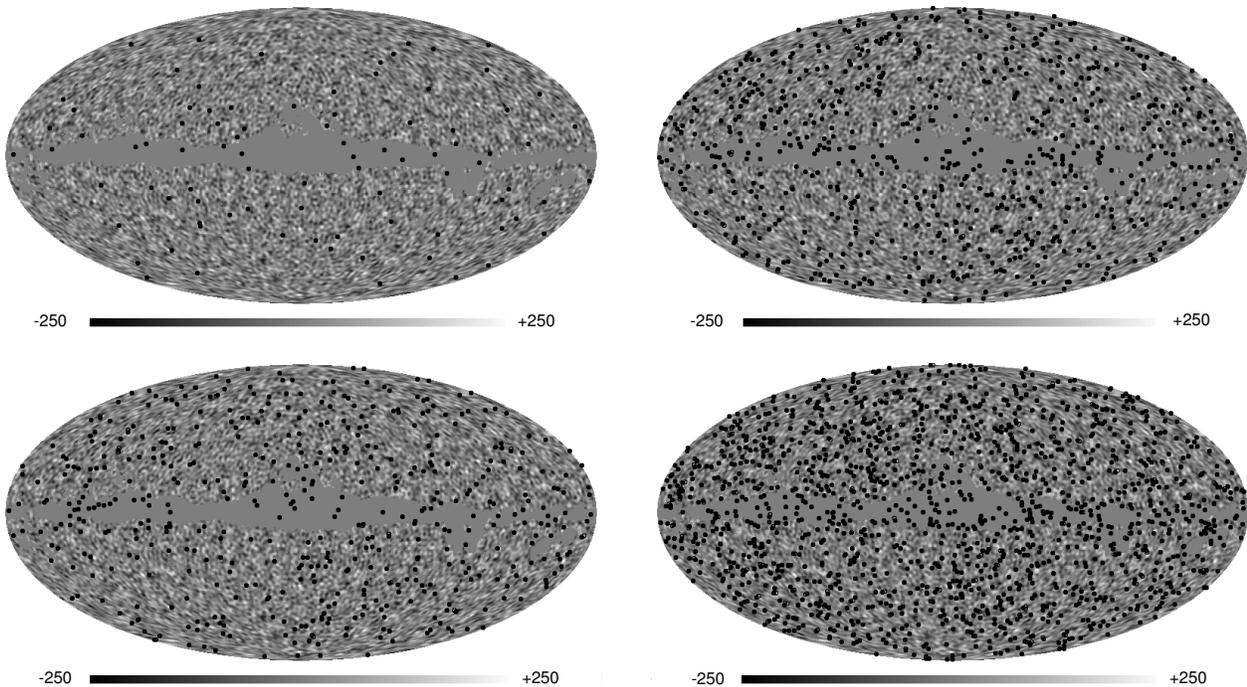


Рис. 5. Положение гамма-всплесков из разных подвыборок на картах СМВ в диапазоне мультиполей $20 < \ell \leq 150$. На карту СМВ наложена маска. Расположение панелей — как на рис. 2.

дают вклад в гистограмму, выходящий за ожидаемый разброс 1σ , показаны на рис. 10. На все карты нанесена экваториальная система координат. Все изображения демонстрируют неравномерное распределение событий на сфере, сконцентрированное у экваториальных полюсов. Во многих случаях горячие пятна располагаются непосредственно в экваториальных полюсах. Для карт с $\ell_{\max} = 20$ и $\ell_{\max} = 150$ с короткими всплесками каталога ВерроSAX наблюдается кластеризация горячих пятен в плоскости Галактики, что более заметно на октополях этих карт (рис. 11). В некоторых случаях наличие или отсутствие событий в распределении GRB выделяет как особенные области полюсов экваториальной системы координат.

Отметим, что данные СМВ миссии Planck имеют те же особенности при сравнении с положениями гамма-всплесков, что и данные WMAP. А именно, отклонения в статистике пикселей связаны с сигналом в направлении на гамма-всплески, чье распределение на сфере «чувствует» экваториальную систему координат. В работе [24] мы оценили вероятность попадания минимумов квадруполь в области радиусом 5° вокруг экваториальных полюсов. Для этого генерировались 10 000 случайных реализаций гауссова сигнала для пикселизации GLESP со 102 пикселями на экваторе. Вероятность случайного попадания в зону полюса — 0.0035.

Для более детального исследования корреляционных эффектов далее применим метод мозаичной корреляции, представленный в работе [26].

3. КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ КАРТЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГАММА-ВСПЛЕСКОВ И PLANCK SMICA

Для исследования свойств карт положений гамма-всплесков и флуктуаций микроволнового фона была проведена мозаичная корреляция карт «BATSE–СМВ» с пикселями разного размера, покрывающими площадки, в рамках которых вычислялся коэффициент корреляции: $500' \times 500'$, $600' \times 600'$ и $900' \times 900'$. Для этого вначале мы пикселизовали карты положений гамма-всплесков всех четырех подвыборок (рис. 12), введя разбиение сферы по пикселям по методу GLESP [31].

Размер пикселя $200' \times 200'$ ($\ell_{\max} = 26$) был выбран, как и на предыдущем этапе, таким, чтобы число событий в соответствующей ему площадке было не меньше трех. Результаты корреляций представлены на рис. 13.

Чтобы проанализировать полученный результат, мы рассчитали угловой спектр мощности карты (2), используя разложение распределенного на

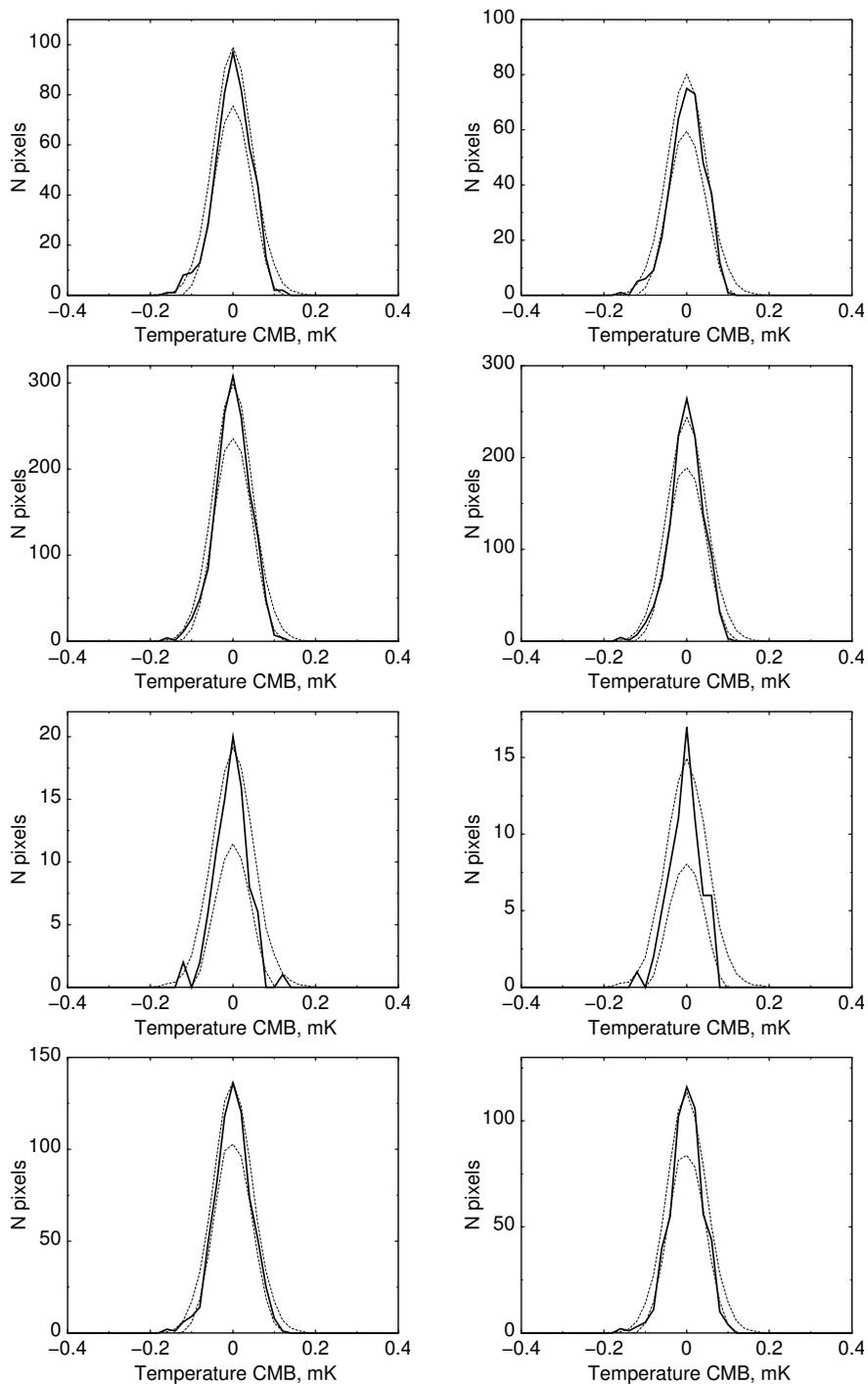


Рис. 6. Распределение значений флуктуаций CMB в пикселях карты SMICA, соответствующих положению гамма-всплесков с разрешением карт $\ell_{\max} = 20$ для разных подвыборок всплесков. Слева приведены результаты без учета маски в карте SMICA, справа — с учетом маски. На верхней паре рисунков отражено распределение коротких ($t < 2$ с) всплесков каталога BATSE. На второй паре рисунков — распределение длинных ($t > 2$ с) гамма-всплесков каталога BATSE. Третья пара содержит распределение сигнала для коротких гамма-всплесков каталога ВерроSAX. Нижняя — для длинных всплесков каталога ВерроSAX. Пунктирными линиями показан 1σ -разброс значений CMB в Λ CDM-космологической модели.

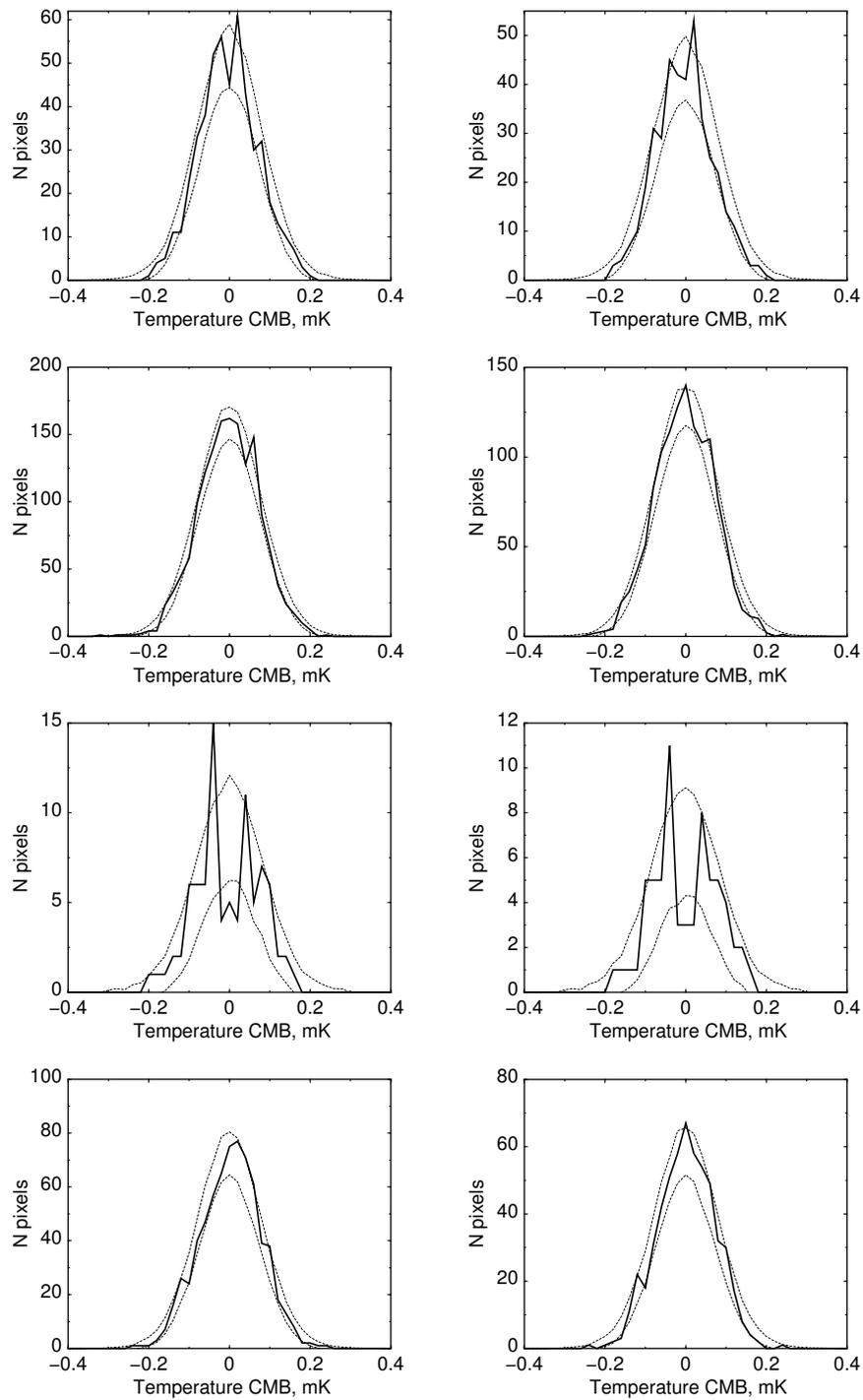


Рис. 7. Распределение значений флуктуаций СМВ в пикселях карты SMICA, соответствующих положению гамма-всплесков, с разрешением карт $\ell_{\max} = 150$ для разных подвыборок GRB. Расположение панелей — как на рис. 6.

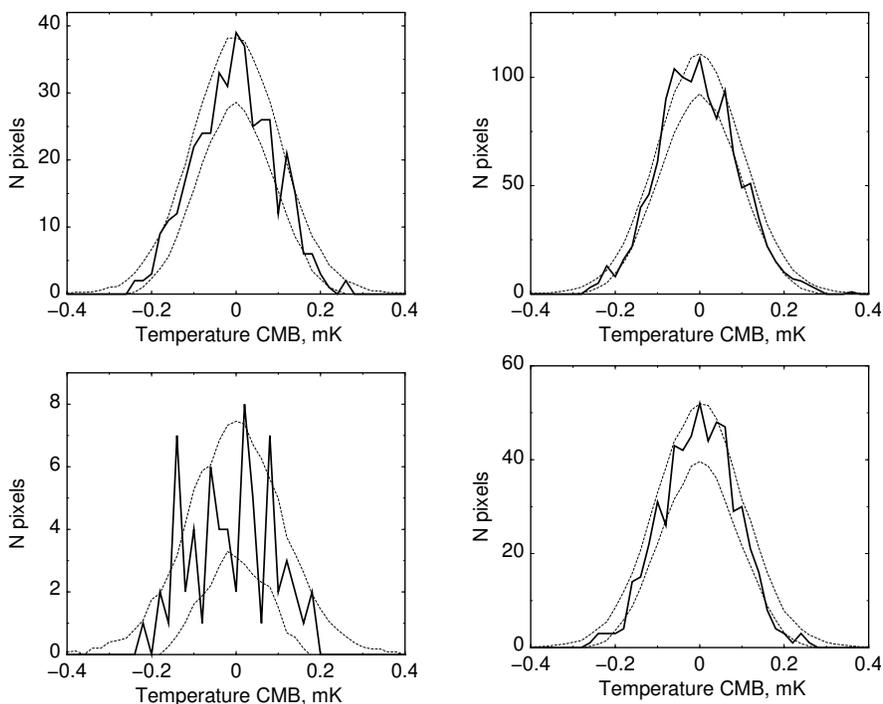


Рис. 8. Распределение значений флуктуаций CMB в пикселях карты SMICA, соответствующих положению гамма-всплесков, с разрешением карт $\ell_{\max} = 300$ для разных подвыборок GRB. Результаты приведены с учетом маски в карте SMICA. Верхний левый рисунок показывает статистику для коротких ($t < 2$ с) гамма-всплесков каталога BATSE. Верхний правый рисунок — для длинных ($t > 2$ с) GRB каталога BATSE. На нижнем левом рисунке приведены результаты для коротких гамма-всплесков каталога ВерроSAX. На нижнем правом рисунке — для длинных событий каталога ВерроSAX. Пунктирными линиями показан 1σ -разброс значений CMB в Λ CDM-космологической модели.

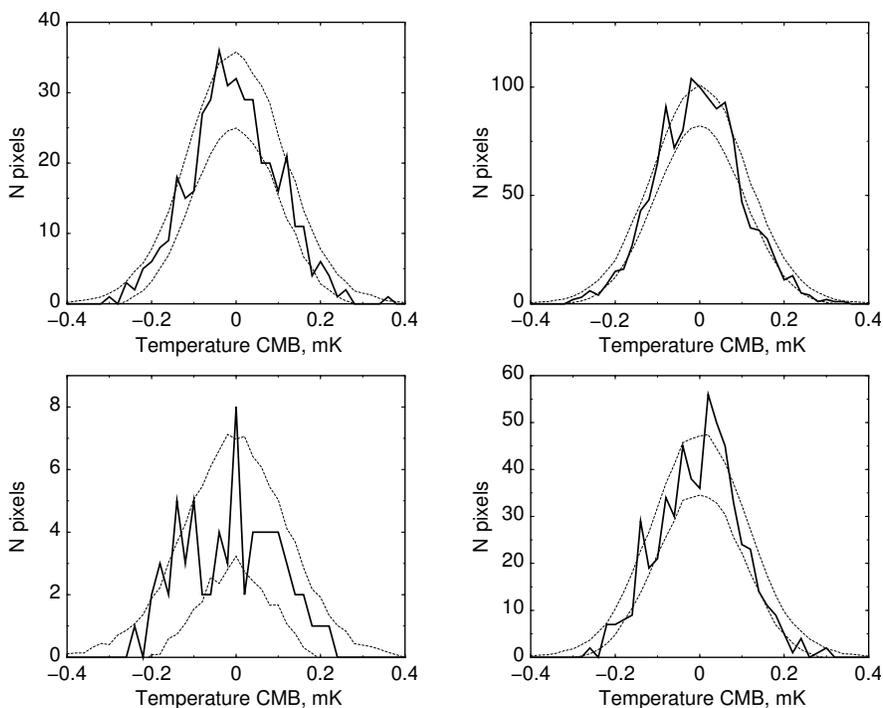


Рис. 9. Распределение значений флуктуаций CMB в пикселях карты SMICA, соответствующих положению гамма-всплесков, с разрешением карт $\ell_{\max} = 600$ для разных подвыборок GRB. Результаты приведены с учетом маски в карте SMICA. Расположение панелей — как на рис. 8.

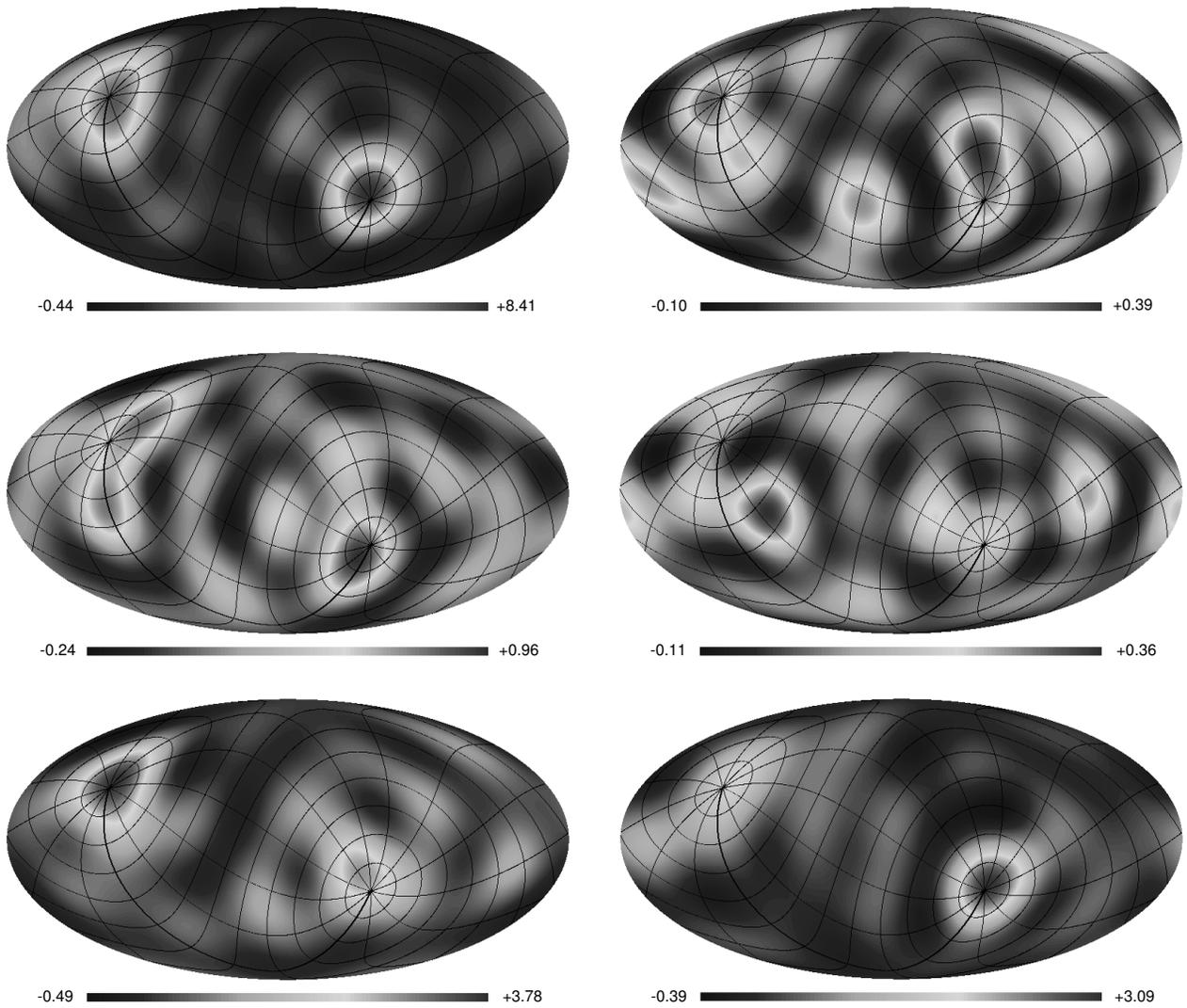


Рис. 10. Сглаженные карты неба до $\ell_{\max} = 7$ для разных подвыборок гамма-всплесков. Карты построены по значениям пикселей СМВ, соответствующих направлению на те GRB, которые отклоняют гистограммы от ожидаемых (см. рис. 6–9). На все карты наложена экваториальная система координат. На верхних рисунках приведены данные для всплесков, сравниваемых с СМВ на картах с разрешением $\ell_{\max} = 20$ (рис. 6), слева — для длинных GRB из каталога BATSE, справа — для коротких всплесков из ВерроSAX. На рисунках в центре ($\ell_{\max} = 150$): слева — данные для коротких всплесков из каталога BATSE, справа — для коротких всплесков из ВерроSAX. На нижней паре рисунков: слева — длинные GRB из каталога BATSE ($\ell_{\max} = 300$), справа — длинные всплески из каталога ВерроSAX ($\ell_{\max} = 600$).

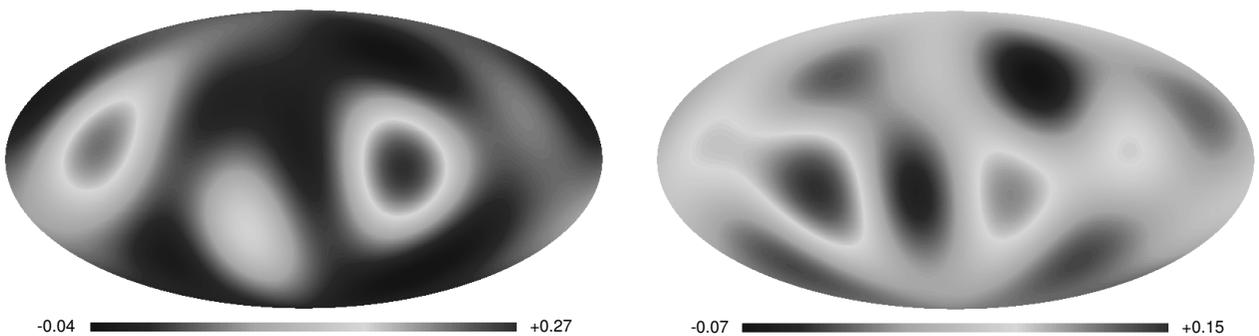


Рис. 11. Октуполь сглаженных карт неба (рис. 10) положений коротких гамма-всплесков из ВерроSAX для $\ell_{\max} = 20$ и $\ell_{\max} = 150$.

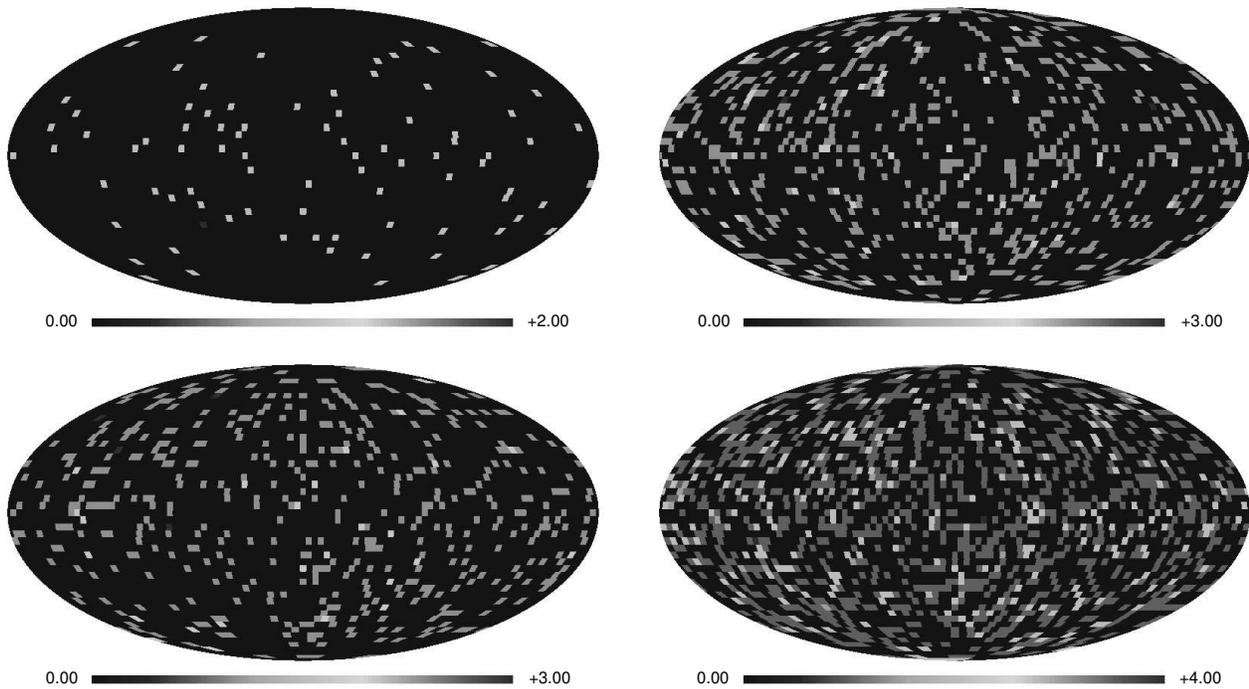


Рис. 12. Пикселизованные карты положений подвыборок гамма-всплесков. Размер пиксела $200' \times 200'$. На левом верхнем рисунке приведены данные для BeppoSAX, $t < 2$ с. На правом верхнем рисунке — данные для BeppoSAX, $t > 2$ с. Левый нижний рисунок показывает карты для данных BATSE, $t < 2$ с. Правый нижний рисунок — для данных BATSE, $t > 2$ с.

сфере сигнала по сферическим гармоникам (мультиполям):

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

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

Угловой спектр мощности позволяет выделить гармоники, дающие вклад в корреляционную карту. На рис. 14–16 приведены спектры мощности карт корреляционных коэффициентов, рассчитанных методом мозаичной корреляции, для данных BATSE и СМВ.

Как показано на рис. 14–16, применение маски сохраняет положение локальных максимумов в спектре мощности мозаичных карт. Причем в ряде случаев использование маски даже усиливает амплитуду выделяющейся гармоники. На рис. 17 показаны примеры таких гармоник. Четвертый мультиполь карты мозаичной корреляции с окном $500' \times 500'$, рассчитанной для данных BATSE ($t < 2$ с), содержит особенность — центральное и самое холодное пятно, лежащее в галактической плоскости (рис. 17 вверху слева). Квадруполь карты корреляций для данных BATSE ($t > 2$ с)

с окном $900' \times 900'$ (рис. 17 внизу слева) чувствителен к экваториальной системе координат. Отметим, что изменение масштаба корреляций (а именно, размера площадки, в которой считается корреляционный коэффициент и присваивается пикселу мозаичной карты) меняет спектр мощности. Так, например, амплитуда гармоники $\ell = 4$ на спектре мощности при переходе от пиксела со стороной $500'$ к $600'$ переходит из положения локального максимума в локальный минимум. Это может быть связано с эффектом увеличения числа множественных событий GRB в площадке соответствующего размера.

4. ОСРЕДНЕНИЕ ПОЛЕЙ

Данные Planck позволяют использовать карты более высокого разрешения, чем архив WMAP. Их можно применить для оценки возможного сигнала от «среднего популяционного GRB» (процедура *stacking*).

Для этой цели выделяются площадки одинакового размера, линейного или углового, вокруг исследуемых объектов, расположенных в разных направлениях на небесной сфере, и суммируются для выявления среднего сигнала. Ввиду отсутствия данных о красных смещениях мы использовали площадки одинакового углового размера. Чтобы

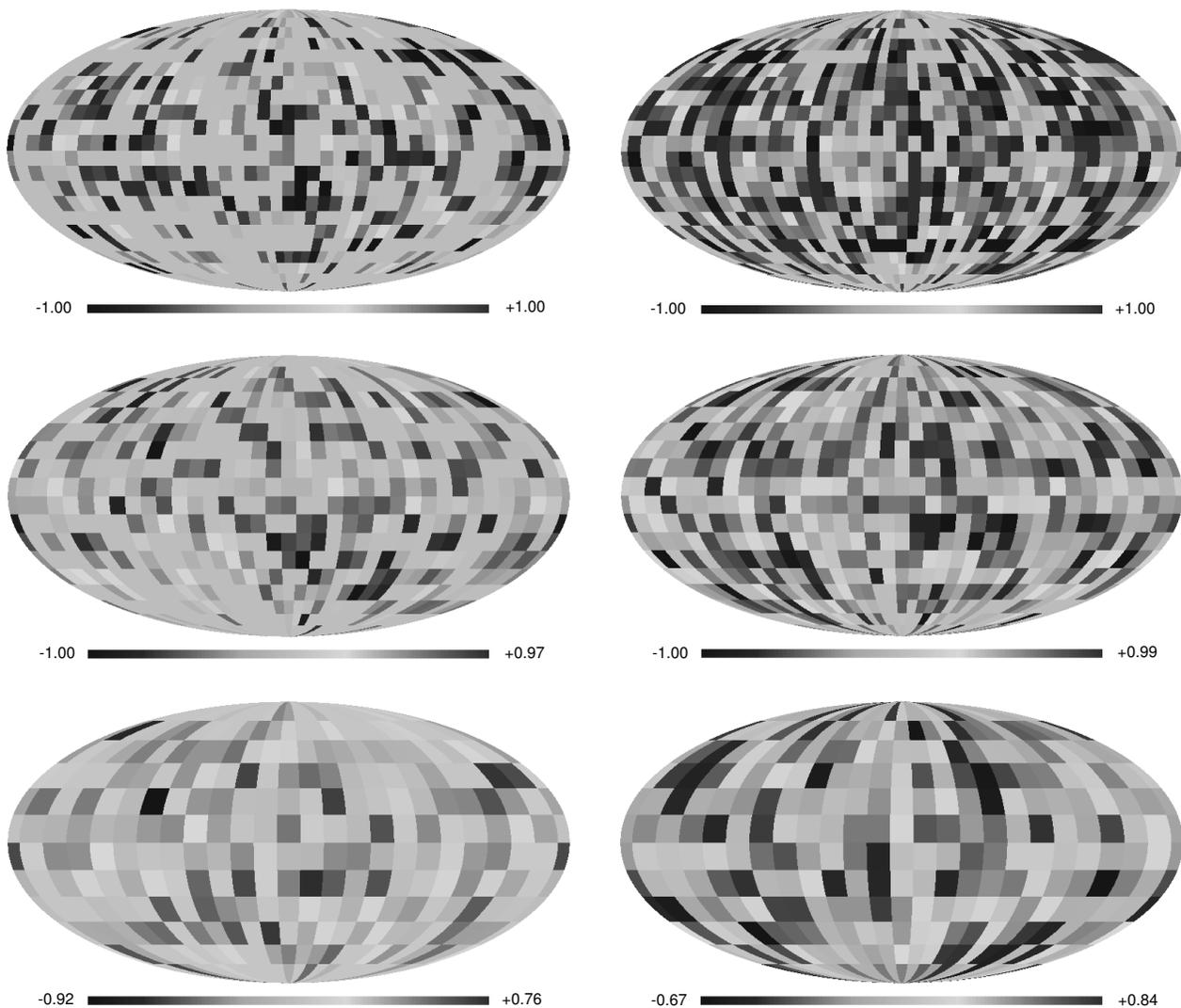


Рис. 13. Корреляционные карты данных СМВ и положений гамма-всплесков каталога BATSE в галактической системе координат. В левой колонке представлены результаты корреляций данных BATSE ($t < 2$ с) и СМВ, в правой — корреляция данных BATSE ($t > 2$ с) и СМВ. Верхняя пара рисунков демонстрирует карты с $\ell_{\max} = 26$ и размером пиксела мозаичной корреляции $500' \times 500'$. На центральной паре рисунков — карты $\ell_{\max} = 8$ с размером пиксела мозаичной корреляций $600' \times 600'$. На нижней паре рисунков — $\ell_{\max} = 5$, размер пиксела корреляций $900' \times 900'$. Интенсивность цвета пиксела отмечает уровень корреляции на соответствующей площадке.

избежать влияния возможного трудноучитываемого сигнала Галактики, ограничимся областями лишь вокруг гамма-всплесков, имевших галактические широты $|b| > 20^\circ$. Среди выборок BATSE и ВерроSAX в этот диапазон попадают 338 коротких (68% от исходного числа коротких GRB BATSE) и 990 (64%) длинных событий каталога BATSE, а также 51 коротких (59% от списка ВерроSAX) и 454 (65%) длинных источников каталога ВерроSAX. Для каждого всплеска из нашей подвыборки мы выбирали поле на карте SMICA Planck размером $2^\circ \times 2^\circ$ в тангенциальной проекции (размер пиксела в площадке приблизительно $80'' \times 80''$). Отобранные поля осреднялись.

Результаты приведены на рис. 18. Отметим, что добавление данных из области $|b| < 20^\circ$ приводит к деградации («размыванию») картинок.

Центр каждого осредненного поля на рис. 18 попадает в область локального экстремума. Причем короткие всплески BATSE и ВерроSAX лежат в области минимума фона, а длинные — в области максимума. Отношение уровня осредненной флуктуации экстремума, на который попадает обобщенный гамма-всплеск, к уровню шума на осредненных картах составляет $dS/N = -1.65, 1.40, -1.43, 2.01$ соответственно для коротких и длинных всплесков BATSE и для коротких и длинных всплесков ВерроSAX. Несмотря на малый уровень

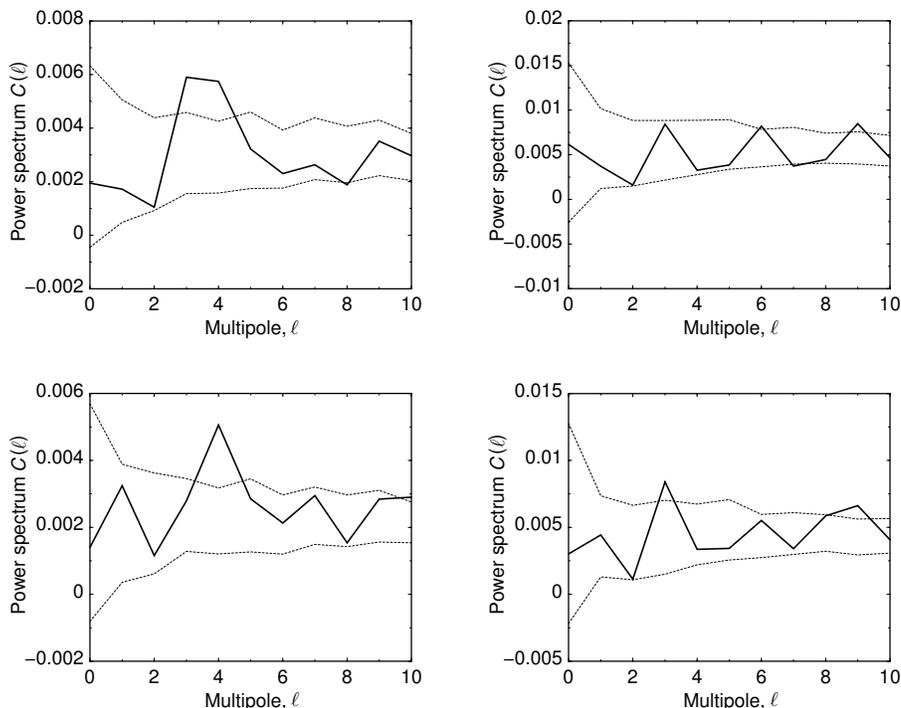


Рис. 14. Спектры мощности карт корреляционных коэффициентов (с разрешением $\ell_{\max} = 26$), рассчитанных для карт положений гамма-всплесков BATSE и распределения СМВ (сплошная линия). Размер пиксела корреляций $500' \times 500'$. На левом верхнем рисунке показан спектр корреляционных данных BATSE для $t < 2$ с и СМВ без учета маски. На правом верхнем рисунке — спектр корреляционных данных BATSE для $t > 2$ с и СМВ без учета маски. Левый нижний рисунок демонстрирует спектр корреляционных данных BATSE для $t < 2$ с и СМВ с учетом маски. Правый нижний рисунок — спектр корреляционных данных BATSE для $t > 2$ с и СМВ с учетом маски. На рисунках показан разброс 1σ , полученный по результатам анализа данных 200 случайных гауссовых реализаций СМВ.

отличия сигнала dS/N на средних картах, различие в знаке может иметь физическое обоснование, которое мы обсудим в следующем разделе.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В данной работе мы провели исследование статистики сигнала СМВ в направлении на гамма-всплески из каталогов BATSE и ВерроSAX. В качестве карты СМВ использовалась карта SMICA Planck. Мы применили три подхода к изучению свойств распределения GRB на сфере. Они включают (1) анализ гистограммы значений сигнала СМВ Planck в направлении на GRB, (2) исследование мозаичных карт, построенных для положений гамма-всплесков и распределения СМВ, а также (3) изучение среднего отклика на карте микроволнового фона в области «среднего популяционного GRB».

Применение первых двух методов демонстрирует, что корреляция положений GRB и СМВ, по крайней мере частично обусловлена сигналом в экваториальной системе координат. Это согласуется с результатами предыдущей работы [24].

Причина такой связи может заключаться в модуляции сигнала СМВ, наблюдаемого в точке L2, микроволновым излучением Земли через далекие лепестки диаграммы направленности антенны. Отклонения в распределении GRB в сторону экваториальной системы вызваны неравномерной чувствительностью (временем накопления сигнала) по небу приемного оборудования гамма-обсерваторий спутников, обращающихся вокруг Земли и всегда направленных в противоположную от нее сторону. Тогда выделенность экваториальной системы координат при поиске корреляции исследуемых данных возникает естественным образом. Отметим, что указание на присутствие признаков (например, расположения пятен) экваториальной системы координат в данных СМВ как для карт WMAP, так и для карт Planck, уже обсуждалась в ряде работ ранее [24, 32, 33]. Кроме того, излучение Земли может быть не единственным фактором. Другой обсуждаемой причиной может быть модуляция солнечного ветра магнитным полем Земли, который проходит через точку L2. Необходимо добавить, что подобные эффекты, не обнаруживаемые при стандартном анализе, могут быть источником

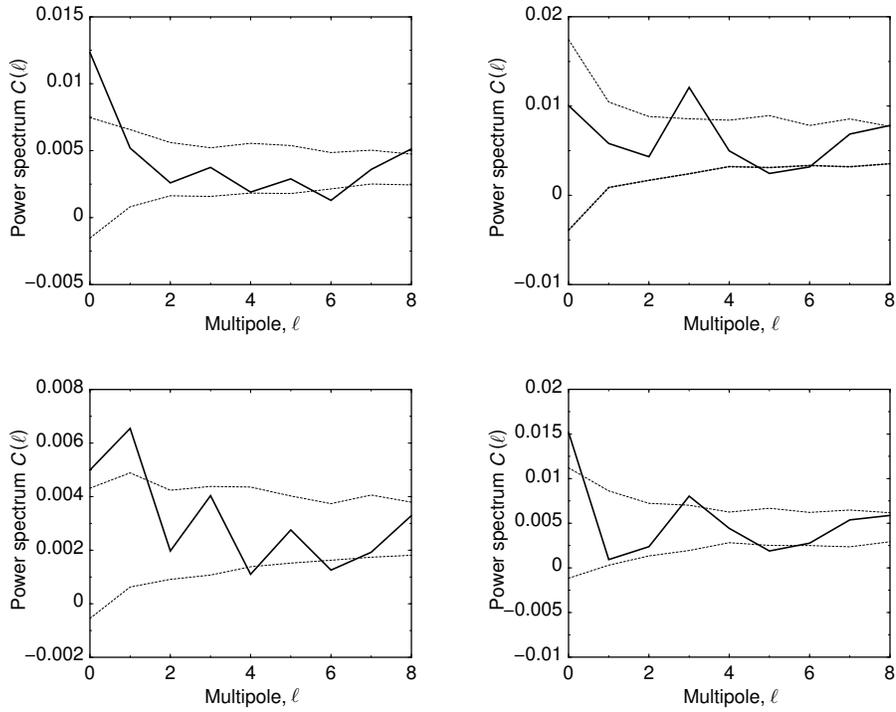


Рис. 15. Спектры мощности карт корреляционных коэффициентов (с разрешением $l_{\max} = 8$), рассчитанных для карт положений гамма-всплесков BATSE и распределения СМВ (сплошная линия). Размер пикселя корреляций $600' \times 600'$. Расположение панелей — как на рис. 14.

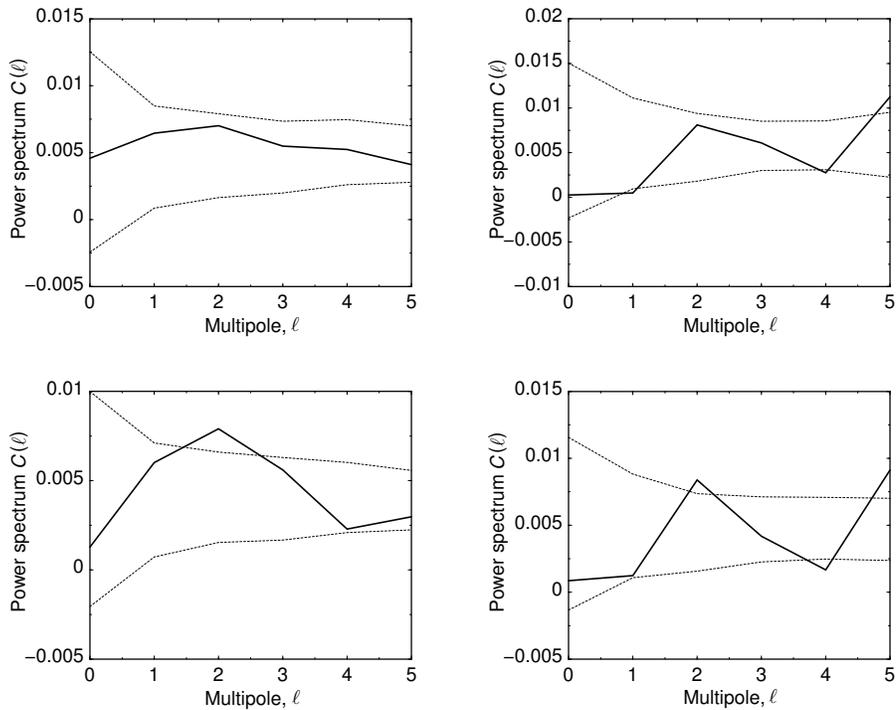


Рис. 16. Спектры мощности карт корреляционных коэффициентов, рассчитанных для мозаичных карт корреляций с разрешением ($l_{\max} = 5$) для положений гамма-всплесков BATSE и данных СМВ (сплошная линия). Размер пикселя корреляций $900' \times 900'$. Расположение панелей — как на рис. 14.

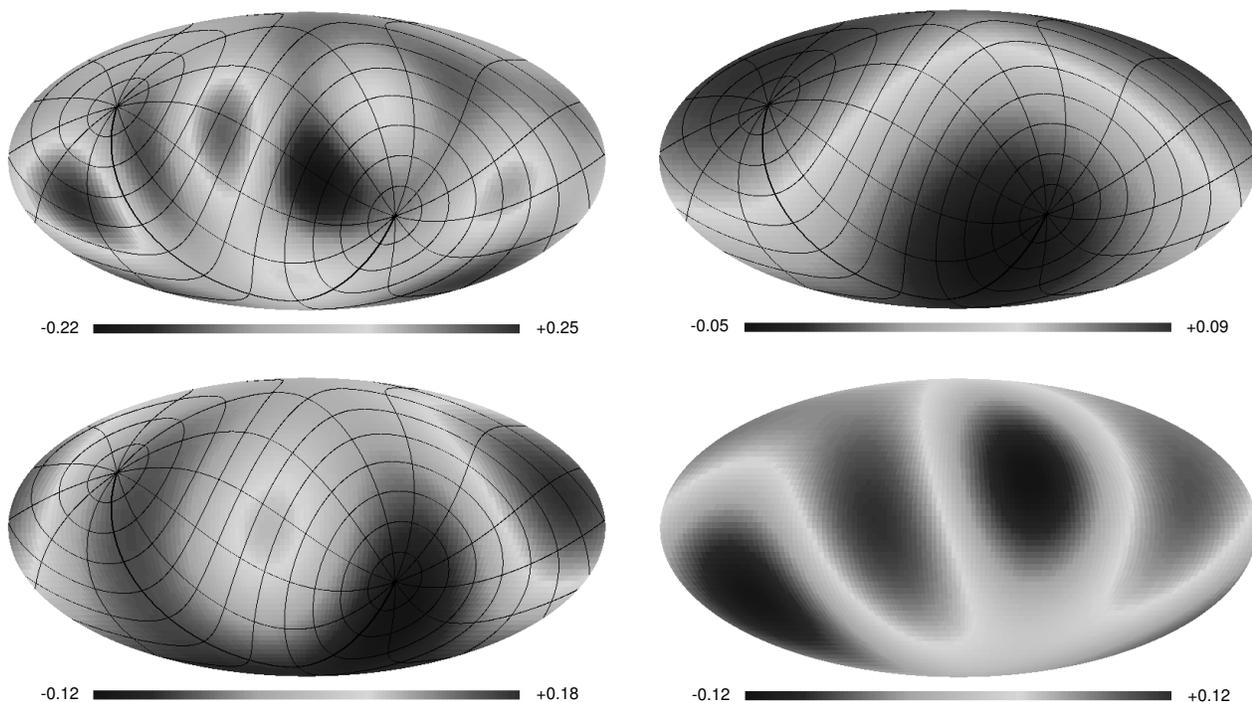


Рис. 17. Карты выделенных гармоник в спектрах мощности (рис. 14–16). На рисунках показаны мультиполи мозаичных корреляций СМВ и положения всплесков. Слева сверху — выделенная гармоника $\ell = 4$ для окна корреляции $500' \times 500'$ для данных BATSE ($t < 2$ с); справа — выделенная гармоника $\ell = 1$ для окна корреляции $600' \times 600'$. Слева снизу — карта корреляций положения всплесков BATSE ($t < 2$ с) и СМВ с окном корреляции $900' \times 900'$ ($\ell = 2$). Справа снизу — карта корреляций положения всплесков BATSE ($t > 2$ с) и СМВ с окном корреляции $900' \times 900'$ ($\ell = 2$). На трех картах показана сетка экваториальной системы координат.

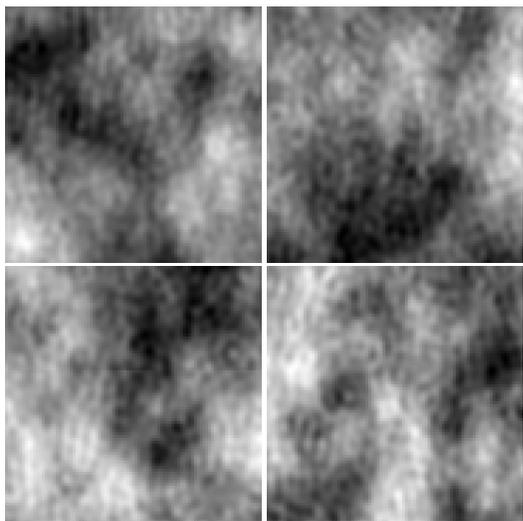


Рис. 18. Результаты осреднения полей СМВ размером $2^\circ \times 2^\circ$ в направлении на гамма-всплески. Слева направо: поля коротких и длинных всплесков из каталогов BATSE (вверху) и ВерроSAX (внизу).

вторичной негауссовости, наблюдаемой на низких гармониках [34–38].

Третий примененный нами метод показал, что в распределении среднего сигнала микроволнового фона в направлении на гамма-всплески имеется незначительное различие на уровне $|S/N| > 1.4$, что может случайно выпасть менее чем в 20% случаев для гауссовых шумов. При этом короткие ($t < 2$ с) всплески на осредненной площадке попадают в локальный минимум фона, а длинные ($t > 2$ с) — в локальный максимум. Если следовать предположению, что короткие GRB возникают в старых эллиптических галактиках, образованных за счет слияния менее массивных галактик и расположенных в скоплениях галактик, то локальный минимум может быть обусловлен эффектом Сюняева–Зельдовича [3]. Для длинных всплесков попадание в локальный максимум распределения фона, вероятно, обусловлено другим эффектом. Если длинные всплески связаны со вспышками сверхновых, т.е. галактиками со звездообразованием, то даже несмотря на расположение в скоплениях галактик, собственное излучение галактик, содержащих пыль и газ, в микроволновом диапазоне будет преобладать над эффектами окружения и приводить к появлению локального максимума на картах СМВ. Данный эффект можно будет прове-

речь с помощью более чувствительных данных эксперимента Планск следующего релиза, публикация которого ожидается во второй половине 2014 г.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают свою признательность ESA за открытый доступ к результатам наблюдений и обработки данных в Planck Legacy Archive. Авторы благодарны Т. Н. Соколовой за прочтение и коррекцию текста. В работе использован пакет GLESP [31, 39, 40] для анализа протяженного излучения на сфере. М. Л. Х. и О. В. В. благодарят РФФИ за частичную поддержку исследования по данной теме грантом № 13-02-00027.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. D. J. Eisenstein, D. H. Weinberg, E. Agol, et al., *Astron. J.* **142**, 72 (2011).
2. R. K. Sachs and A. M. Wolfe, *Astrophys. J.* **147**, 73 (1967).
3. R. A. Sunyaev and Ya. B. Zeldovich, *Astrophys. and Space Sci.* **7**, 3 (1970).
4. P. J. E. Peebles, *Principles of Physical Cosmology* (Princeton Univ. Press, 1993).
5. J. A. Peacock, *Cosmological Physics* (Cambridge Univ. Press, 2000).
6. L. Rudnick, S. Brown, and L. R. Williams, *Astrophys. J.* **671**, 40 (2007).
7. V. Springel, C. S. Frenk, and S. D. M. White, *Nature* **440**, 1137 (2006).
8. J. Yadav, S. Bharadwaj, B. Pandey, and T. R. Seshadri, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **364**, 601 (2005).
9. P. Sarkar, J. Yadav, B. Pandey, and S. Bharadwaj, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **399**, L128 (2009).
10. F. Sylos Labini and Y. V. Baryshev, *J. Cosmology and Astroparticle Phys.* **6**, 021 (2010).
11. W. A. Watson, I. T. Iliev, J. M. Diego, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **437**, 3776 (2014).
12. Ya. V. Naiden and O. V. Verkhodanov, *Astrophysical Bulletin* **68**, 471 (2013).
13. J. F. Navarro, C. S. Frenk, and S. D. M. White, *Astrophys. J.* **490**, 493 (1997).
14. M. L. Khabibullina and O. V. Verkhodanov, *Astronomy Reports* **55**, 302 (2011).
15. L. Amati, F. Frontera, M. Tavani, et al., *Astron. and Astrophys.* **390**, 81 (2002).
16. L. Amati, C. Guidorzi, F. Frontera, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **391**, 577 (2008).
17. D. Riccia, F. Fioreb, and P. Giommia, *Nuclear Phys. B Proc. Suppl.* **69**, 618 (1999).
18. W. S. Paciasas, C. A. Meegan, G. N. Pendleton, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **122**, 465 (1999).
19. R. Vavrek, et al., *AIP Conf. Proc.*, № 662, 163 (2003).
20. L. L. R. Williams and N. Frey, *Astrophys. J.* **583**, 594 (2003).
21. A. Mészáros and J. Stocek, *Astron. and Astrophys.* **403**, 443 (2003).
22. A. Bernui, I. S. Ferreira, and C. A. Wuensche, *Astrophys. J.* **673**, 968 (2008).
23. A. Mészáros, L. G. Balázs, Z. Bagoly, and P. Veres, *AIP Conf. Proc.*, № 1133, 483 (2009).
24. O. V. Verkhodanov, V. V. Sokolov, M. L. Khabibullina, and S. V. Karpov, *Astrophysical Bulletin* **65**, 238 (2010).
25. V. N. Yershov, V. V. Orlov, and A. A. Raikov, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **423**, 2147 (2012).
26. O. V. Verkhodanov, M. L. Khabibullina, and E. K. Majorova, *Astrophysical Bulletin* **64**, 263 (2009).
27. O. V. Verkhodanov and M. L. Khabibullina, *Astrophysical Bulletin* **65**, 390 (2010).
28. N. Jarosik, C. L. Bennett, J. Dunkley, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **192**, 14 (2011).
29. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), arXiv:1303.5062.
30. P. A. R. Ade et al. (Planck Collab.), arXiv:1303.5072.
31. A. G. Doroshkevich, O. B. Verkhodanov, P. D. Naselsky, et al., *Int. J. Mod. Phys. D* **20**, 1053 (2011).
32. O. V. Verkhodanov, *Astrophysical Bulletin* **69**, 330 (2014).
33. Ya. V. Naiden and O. V. Verkhodanov, *Astrophysical Bulletin* **69**, 488 (2014).
34. A. Rakic and D. J. Schwarz, *Phys. Rev. D* **75**, 103002 (2007).
35. Ja. Kim and P. Naselsky, *Phys. Rev. D* **82**, 063002 (2010).
36. O. V. Verkhodanov, *Phys. Usp.* **55**, 1098 (2012).
37. M. Hansen, J. Kim, A. M. Frejsel, et al., *J. Cosmology and Astroparticle Phys.* **10**, 059 (2012).
38. C. J. Copi, D. Huterer, D. J. Schwarz, and G. D. Starkman, arXiv:1311.4562.
39. A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, O. V. Verkhodanov, et al., *Int. J. Mod. Phys. D* **14**, 275 (2003).
40. O. V. Verkhodanov, A. G. Doroshkevich, P. D. Naselsky, et al., *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **58**, 40 (2005).

Statistics of the Planck CMB Signal in Direction of Gamma-Ray Bursts from the BATSE and BeppoSAX Catalogs

M. L. Khabibullina, O. V. Verkhodanov, and V. V. Sokolov

Distribution of gamma-ray bursts (GRBs) from catalogs of the BATSE and BeppoSAX space observatories relative to the cosmic microwave background (CMB) data by Planck space mission is studied. Three methods were applied for data analysis: (1) a histogram of CMB signal values in GRB directions, (2) mosaic correlation maps calculated for GRB locations and CMB distribution, (3) calculation of an average response in the area of “average GRB population” on the CMB map. A correlation between GRB locations and CMB fluctuations was detected which can be interpreted as the systematic effects in the process of observations. Besides, in the averaged areas of CMB maps, a difference between the distributions of average fluctuations for short and long GRBs was detected which can be caused by different natures of these events.

Keywords: *cosmic background radiation—gamma-rays: bursts*