

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ АНИЗОТРОПИИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ С $E_0 \geq 10^{19}$ эВ ПО ДАННЫМ ЯКУТСКОЙ УСТАНОВКИ ШАЛ

А. В. Глушков*

*Институт космофизических исследований и астрономии Якутского научного центра им. Ю. Г. Шафера
Сибирского отделения Российской академии наук
677891, Якутск, Россия*

Поступила в редакцию 2 февраля 2009 г.

Приведены результаты анализа направлений прихода первичных частиц с энергией $E_0 \geq 10^{19}$ эВ и зенитными углами $\theta \leq 60^\circ$, зарегистрированных на Якутской установке за период 1974–2009 гг. Показано, что эти события, разделенные между собой разными временными интервалами, имеют разную глобальную анизотропию.

PACS: 96.50.S-, 98.70.-f

1. ВВЕДЕНИЕ

Поиск источников первичного космического излучения (ПКИ), образующего широкие атмосферные ливни (ШАЛ) с предельно высокими энергиями $E_0 \geq 10^{19}$ эВ является одной из наиболее трудных задач астрофизики. Это связано, главным образом, с очень низким их потоком. В работах [1–14] показано, что космические лучи указанных энергий имеют положительную корреляцию с плоскостью Сверхгалактики (местного сверхскопления галактик). Недавно группа Auger сообщила о том, что основными источниками ПКИ с энергией $E_0 \geq 5.7 \cdot 10^{19}$ эВ являются галактики с активными ядрами, расположенные в местном объеме пространства с радиусом 75 Мпк [15]. Этот вывод отчасти подтвердился в работе [16] для событий с $E_0 \geq 4 \cdot 10^{19}$ эВ, зарегистрированных на Якутской установке. Результаты, представленные в работах [15, 16], можно рассматривать как согласующиеся с результатами работ [1–14], если иметь в виду, что большинство галактик с активными ядрами расположены в плоскости Сверхгалактики [8, 15].

Известно, что галактики с активными ядрами являются крайне нестабильными объектами. Их активность спорадически может увеличиваться в течение

нескольких дней во много раз. Если такие галактики действительно являются одними из вероятных источников ПКИ с $E_0 \geq 10^{19}$ эВ, то не исключено, что эта особенность может как-то проявляться в анизотропии последних. Мы решили исследовать глобальную анизотропию ПКИ с указанными энергиями в зависимости от частоты их прихода. Ниже приведены экспериментальные результаты, которые демонстрируют некоторые новые особенности анизотропии ПКИ предельно высоких энергий.

2. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В этой работе рассмотрены ШАЛ с энергиями $E_0 \geq 10^{19}$ эВ и зенитными углами $\theta \leq 60^\circ$, зарегистрированные на Якутской установке за период 1974–2009 гг. Эти события отбираются наибольшим числом детекторов с эффективностью около 100 % и дают минимальные ошибки при нахождении основных параметров ШАЛ (направления прихода, координат оси, E_0 и др.). Их угловая точность не хуже $2\text{--}3^\circ$. Кроме того, заряженные частицы с такими энергиями менее всего подвержены влиянию магнитных полей и направления их прихода в первую очередь могут указывать на источники.

Энергия E_0 находилась из соотношений

$$E_0 [\text{эВ}] = (4.8 \pm 1.6) \cdot 10^{17} (\rho_{s,600}(0^\circ))^{1.00 \pm 0.02}, \quad (1)$$

*E-mail: a.v.glushkov@ikfia.ysn.ru

Таблица 1. Превышение наблюдаемого числа ливней N_{obs} над ожидаемым N_{ran} для изотропного потока на величину $n_\sigma = (N_{obs} - N_{ran})/\sigma$ в единицах стандарта $\sigma = \sqrt{N_{ran}}$

$\leq T$, суток	Число ливней	n_σ	
		Галактика	Сверхгалактика
4	82	1.1	1.1
6	130	1.7	0.8
8	183	2.1	1.8
10	226	2.2	0.9
12	257	2.5	1.1
14	273	2.0	2.0
16	298	1.4	2.8
18	316	1.4	2.8
20	331	1.5	2.8
22	342	1.3	2.8

Таблица 2. Превышение наблюдаемого числа ливней N_{obs} над ожидаемым N_{ran} для изотропного потока на величину $n_\sigma = (N_{obs} - N_{ran})/\sigma$ в единицах стандарта $\sigma = \sqrt{N_{ran}}$

$\geq T$, суток	Число ливней	n_σ	
		Галактика	Сверхгалактика
4	394	0.5	2.8
6	380	1.4	3.0
8	362	1.6	3.0
10	335	1.6	3.1
12	313	1.4	3.2
14	292	1.4	3.5
16	260	1.1	3.9
18	248	0.9	3.8
20	229	0.6	3.8
22	216	0.3	3.8

$$\rho_{s,600}(0^\circ) [\text{м}^{-2}] = \rho_{s,600}(\theta) \exp(1020(\sec \theta - 1)/\lambda_\rho), \quad (2)$$

$$\lambda_\rho [\text{г/см}^2] = (450 \pm 44) + (32 \pm 15) \lg(\rho_{s,600}(0^\circ)), \quad (3)$$

где $\rho_{s,600}(\theta)$ — плотность заряженных частиц, измеряемая наземными сцинтилляционными детекторами на расстоянии $R = 600$ м от оси ливня с точностью, приблизительно равной 30%. Всего за указанный выше период было зарегистрировано 730 ливней. Площадь Якутской установки до осени 1992 г. была больше, чем сейчас. Поэтому для единообразия выборок по годам мы взяли для анализа не все эти ливни, а лишь 417 их них, оси которых оказались внутри центрального круга установки с радиусом 1900 м. Средний интервал времени, разделяющий эти события между собой, составил приблизительно 20 суток.

Мы исследовали потоки ПКИ этой выборки, приходящие из плоскостей Галактики и Сверхгалактики в зависимости от длительности интервалов между двумя, следующими друг за другом событиями. В табл. 1 приведены данные для событий с интервалами, не превышающими длительность, указанную в первом столбце, а в табл. 2 — для событий с интервалами, превышающими эту длительность. В третьих и четвертых колонках таблиц показаны от-

клонения наблюдаемого (N_{obs}) числа ливней от ожидаемого (N_{ran}) для изотропного потока в единицах стандарта $\sigma = \sqrt{N_{ran}}$: $n_\sigma = (N_{obs} - N_{ran})/\sigma$. Значения N_{ran} находились из розыгрыша методом Монте-Карло случайно распределенных по небесной сфере событий. Делалось это следующим образом. Для каждого ливня путем замены у него реально измеренного времени прихода и азимута (в горизонтальной системе координат установки) на случайные находилось по 500 направлений в сверхгалактических координатах. Полученные таким образом распределения случайных событий нормировались затем по абсолютной величине на реальные.

На рис. 1а гистограммой и линией изображены соответственно наблюдаемое и ожидаемое для изотропного потока распределения направлений прихода 260 ливней с интервалами между ними $T \geq 16$ суток в зависимости от широты их прихода в сверхгалактических координатах (с шагом $\Delta b_{SG} = 6^\circ$). Северный полюс Сверхгалактики имеет экваториальные координаты $\alpha = 286.2^\circ$ и $\delta = 14.1^\circ$. Затемненный участок (пик) соответствует превышению наблюдаемого числа ливней над ожидаемым на величину $n_\sigma = 3.9\sigma$. Это превышение особенно заметно на фоне прилегающих к пику провалов. Оно явно указывает на корреляцию этих событий с плоскостью Сверхгалактики.

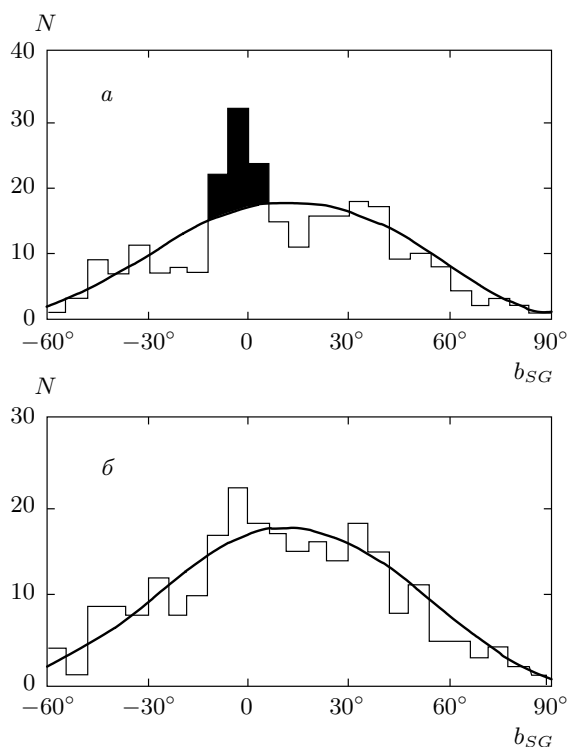


Рис. 1. Распределения направлений ШАЛ с $E_0 \geq 10^{19}$ эВ и $\theta \leq 60^\circ$ в зависимости от широты их прихода в сверхгалактических координатах: события с разделяющим их промежутком времени $T \geq 16$ суток (а), $T \leq 12$ суток (б), гистограммы и кривые линии — соответственно наблюдаемые и ожидаемые для изотропного потока значения; затемненный участок — значимый избыток наблюдаемых событий на 3.9σ

На рис. 1б показаны аналогичные распределения направлений прихода 257 ливней с интервалами между ними $T \leq 12$ суток. Мы не видим здесь никакой корреляции с плоскостью Сверхгалактики. Однако картина существенно меняется, если перейти в галактическую систему координат (рис. 2). У этой выборки вблизи плоскости Галактики имеется небольшой избыток событий на уровне 2.5σ (затемненный участок), а события, показанные на рис. 2а, демонстрируют полное согласие с изотропным потоком. Следует заметить, что в работах [4, 8] мы уже указывали на избыточные потоки ПКИ с $E_0 \geq 5 \cdot 10^{18}$ эВ из плоскостей Сверхгалактики и (в меньшей степени) Галактики у событий, образующих кластеры в телесных углах с радиусом $\leq 3^\circ$. Примерно такую же картину мы видим сейчас.

Чтобы лучше понять суть полученных резуль-

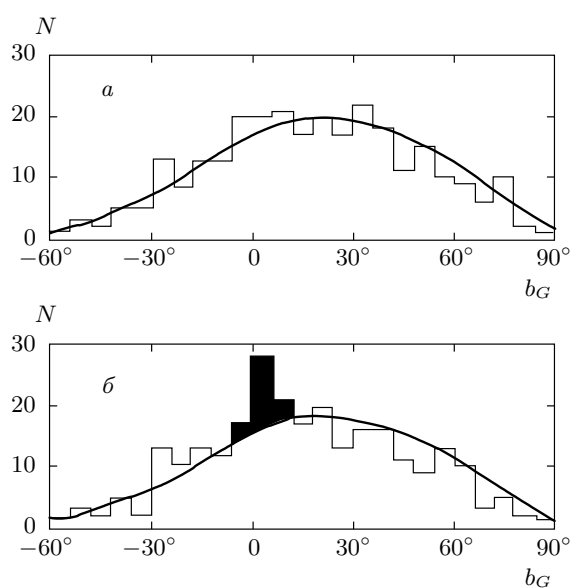


Рис. 2. Распределения направлений ШАЛ с $E_0 \geq 10^{19}$ эВ и $\theta \leq 60^\circ$ в зависимости от широты их прихода в галактических координатах (обозначения аналогичны рис. 1)

татов, мы дополнительно изучили распределения направлений прихода рассмотренных выше ливней на небесной сфере. На рис. 3 показаны топологические карты плотностей 260 событий с интервалами $T \geq 16$ суток (а) и 257 событий с $T \leq 12$ суток (б), вошедшие в распределения на рис. 1 и рис. 2. Мы исследовали отклонения наблюдаемого числа событий N_1 от ожидаемого среднего $\langle N \rangle = N_2 \Omega_1 / \Omega_2$ в единицах стандарта $\sigma = \sqrt{\langle N \rangle}$:

$$k_\sigma = (N_1 - \langle N \rangle) / \sigma, \tag{4}$$

где N_1 и N_2 — количество ливней в телесных углах $\Omega_1 = 2\pi(1 - \cos\theta_1)$ и $\Omega_2 = 2\pi(1 - \cos\theta_2)$ соответственно ($\theta_1 = 20^\circ$, $\theta_2 = 60^\circ$). Значения (4) находились при последовательном перемещении центра площадки $1^\circ \times 1^\circ$ по всей северной полусфере Земли, доступной наблюдению Якутской установки ШАЛ. Пределы изменения k_σ представлены в нижней части рисунка в виде тональной шкалы. Наиболее светлые области соответствуют избыточному потоку над средним уровнем на $k_\sigma \geq 3\sigma$. Кривой SG изображена плоскость Сверхгалактики.

На рис. 3а видно, что избыточный поток ПКИ с $E_0 \geq 10^{19}$ эВ сконцентрирован в виде относительно узкой области вдоль диска Сверхгалактики. Он и да-ет отмеченный выше пик на рис. 1а. А вот события на рис. 3б распределены совершенно по-другому.

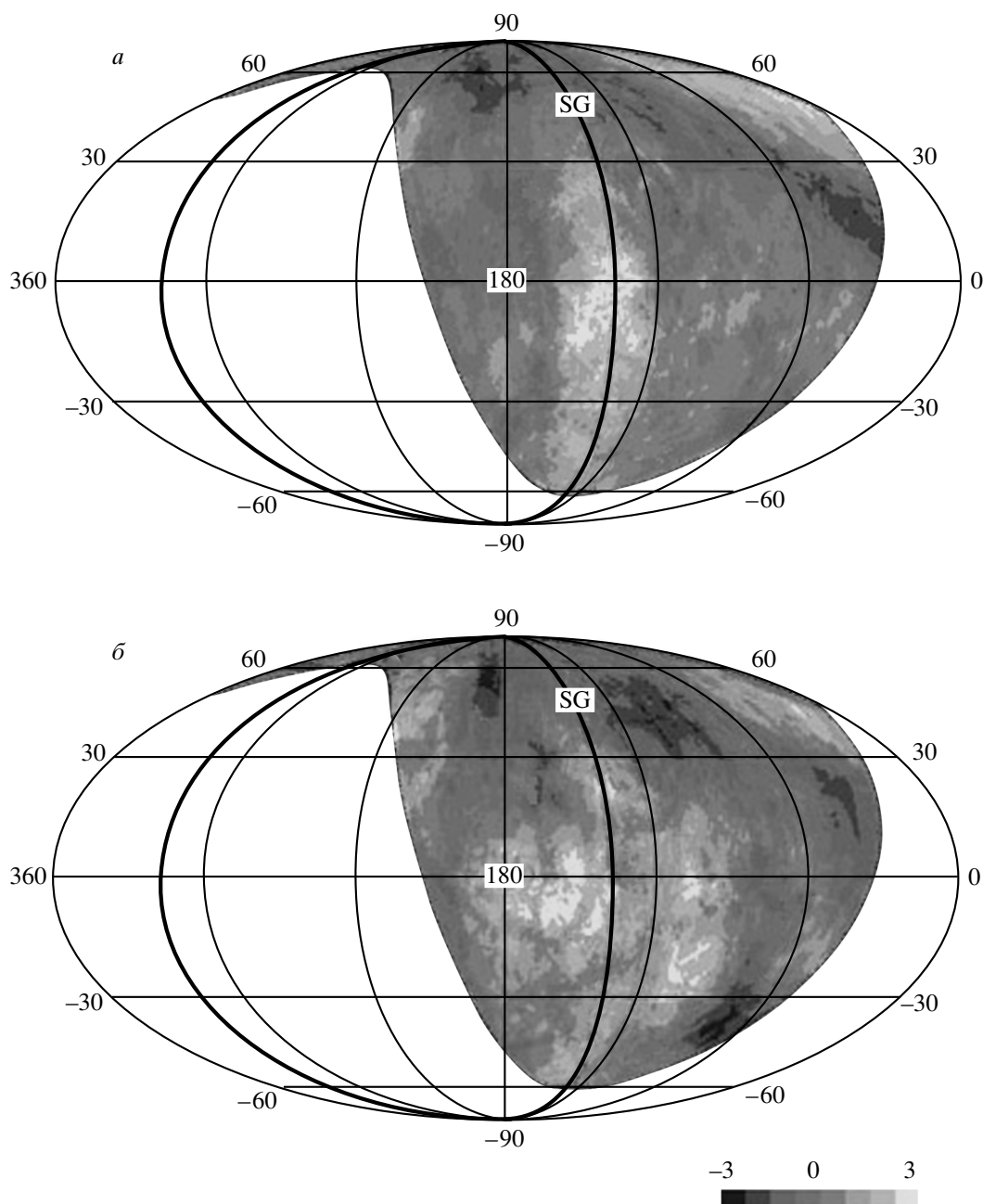


Рис. 3. Отклонения наблюдаемого числа ливней N_1 от ожидаемого среднего $\langle N \rangle$ в единицах $k_\sigma = (N_1 - \langle N \rangle) / \sqrt{\langle N \rangle}$ на развернутой небесной сфере в галактических координатах для ПКИ с $E_0 \geq 10^{19}$ эВ в выборках с интервалами $T \geq 16$ суток (а) и $T \leq 12$ суток (б). Кривая SG — плоскость Сверхгалактики

Избыточный поток ПКИ здесь представлен в виде нескольких локальных образований (полюсов), сосредоточенных достаточно близко друг к другу вокруг видимого направления пересечения дисков Галактики и Сверхгалактики при галактической долготе, приблизительно равной 137° . Два таких полюса,

расположенные в экваториальной области Галактики, как раз и проявились в виде пика на рис. 2б.

Следует заметить, что выборы интервалов на рис. 1–3 носят в какой-то мере условный характер. При $T \geq 16$ суток этот интервал соответствует началу значимой корреляции направлений прихода ПКИ

с плоскостью Сверхгалактики для максимального числа ливней (табл. 2), а при $T \leq 12$ суток — отсутствию таковой (табл. 1). Кроме того, часть ливней при любых T присутствует в обеих выборках и ослабляет различия анизотропии на рис. 3.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Если подытожить сказанное выше, возникает следующая картина. Результаты измерения ПКИ с энергиями $E_0 \geq 10^{19}$ эВ на Якутской установке ШАЛ подтверждают установленную ранее в работах [1–14] корреляцию направлений их прихода с плоскостью Сверхгалактики. В настоящей работе обнаружена более «тонкая» структура глобальной анизотропии ПКИ предельно высоких энергий, а именно, корреляция с плоскостями Сверхгалактики или Галактики в зависимости от группового характера прихода этих событий. Эта особенность космических лучей предельно высоких энергий требует дальнейшего, более глубокого и всестороннего исследования. Но уже сейчас можно сказать, что некоторая часть частиц с такими энергиями образуется в Сверхгалактике (рис. 3а), где их источниками могут быть галактики с активными ядрами. Другая их часть (с $T \leq 12$ суток) образует «временные кластеры» и имеет, вероятно, другое происхождение. Можно предположить, что эти частицы рождаются в результате каких-то взрывных процессов непосредственно в нашей Галактике. Начата работа по исследованию структурных функций электронной и мюонной компонент ШАЛ этих выборок, доли мюонов в них, образования ими пространственных кластеров.

ЛИТЕРАТУРА

1. T. Stanev et al., Phys. Rev. Lett. **75**, 3056 (1995).
2. А. В. Глушков, Письма в ЖЭТФ **73**, 355 (2001).
3. А. В. Глушков, И. Е. Слепцов, Изв. РАН, сер. физ. **65**, 437 (2001).
4. А. В. Глушков, М. И. Правдин, ЖЭТФ **119**, 1029 (2001).
5. А. В. Глушков, М. И. Правдин, Письма в Астрон. ж. **27**, 577 (2001).
6. А. В. Глушков, Письма в Астрон. ж. **28**, 341 (2002).
7. А. В. Глушков, ЯФ **66**, 886 (2003).
8. А. В. Глушков, ЯФ **67**, 983 (2004).
9. А. В. Глушков, ЯФ **68**, 262 (2005).
10. А. В. Глушков, М. И. Правдин, ЖЭТФ **128**, 103 (2005).
11. А. В. Глушков, Изв. РАН, сер. физ. **69**, 366 (2005).
12. А. В. Глушков, ЯФ **70**, 353 (2007).
13. А. В. Глушков, ЯФ **71**, 1431 (2008).
14. А. В. Глушков, ЯФ **72**, 91 (2009).
15. The Pierre Auger Collaboration, astro-ph/0711.2256v1.
16. А. А. Иванов, Письма в ЖЭТФ **67**, 215 (2008).