

УДК 524.1

## АНИЗОТРОПИЯ НАПРАВЛЕНИЙ ГРУПП МЮОНОВ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ НЕВОД

© 2019 г. С. С. Хохлов<sup>1</sup>, \*, М. Б. Амелчаков<sup>1</sup>, В. С. Воробьев<sup>1</sup>,  
З. Т. Ижбулякова<sup>1</sup>, А. А. Ковыляева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
“Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, Россия

\*E-mail: SSKhokhlov@mephi.ru

Поступила в редакцию 10.10.2018 г.

После доработки 20.02.2019 г.

Принята к публикации 26.04.2019 г.

Приведены результаты исследования анизотропии потока космических лучей сверхвысоких энергий по группам мюонов. События были зарегистрированы в 2012–2018 гг. координатно-трековым детектором ДЕКОР, входящим в состав уникальной научной установки “Экспериментальный комплекс НЕВОД”. Обсуждаются результаты анализа анизотропии для двух выборок событий с группами мюонов, которые соответствуют различным диапазонам энергии первичных частиц ( $E > 10^{15}$  эВ и  $E > 10^{16}$  эВ), и приводятся оценки параметров дипольной анизотропии – амплитуда и фаза.

DOI: 10.1134/S0367676519080180

### ВВЕДЕНИЕ

Традиционно исследования космических лучей сверхвысоких энергий проводятся по широкому атмосферным ливням (ШАЛ), возможность таких исследований определяется площадью установки. При регистрации групп мюонов от наклонных ливней статистика определяется поперечными размерами ШАЛ, которые при больших зенитных углах увеличиваются в сотни раз, что позволяет с помощью относительно небольшого координатно-трекового детектора регистрировать ливни с энергиями до  $10^{19}$  эВ [1].

Поскольку в координатно-трековом детекторе регистрируется сразу несколько квазипараллельных треков мюонов, точность восстановления направления прихода группы выше, чем точность для одного трека. При этом направление прихода группы мюонов с очень хорошей точностью совпадает с направлением движения первичной частицы, что позволяет проводить исследования анизотропии потока первичных космических лучей.

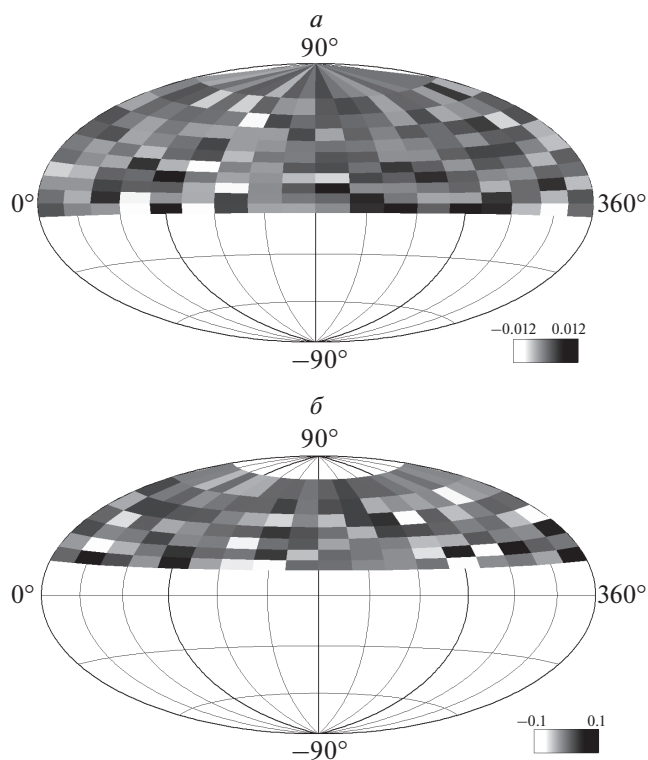
### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Координатно-трековый детектор ДЕКОР [2] входит в состав Экспериментального комплекса НЕВОД (НИЯУ МИФИ, Москва). Восемь супермодулей (СМ) детектора ДЕКОР расположены вдоль трех сторон бассейна черенковского водного детектора [3, 4]. Каждый супермодуль с рабочей площадью  $\sim 8.4$  м<sup>2</sup> состоит из восьми верти-

кальных плоскостей стримерных трубок. Двухкоординатный съем информации со стримерных трубок обеспечивает высокую пространственную ( $\sim 1$  см) и угловую ( $0.8^\circ$ ) точность реконструкции треков мюонов. Вертикальное расположение плоскостей СМ позволяет регистрировать группы мюонов под большими зенитными углами.

Анализ дипольной анизотропии космических лучей проводился для двух выборок событий [5]. К первой выборке относятся программно отобранные события с тремя треками мюонов, зарегистрированными не менее чем в трех СМ ДЕКОР. Группы мюонов в таких событиях формируются в основном первичными космическими частицами с энергиями выше  $10^{15}$  эВ [6]. В период с 03.05.2012 по 27.02.2018 гг. было зарегистрировано  $\sim 8.7$  млн таких событий. При этом “живое” время измерений составило  $\sim 1513$  сут.

Ко второй выборке относятся события, в которых зарегистрировано как минимум 5 квазипараллельных треков мюонов не менее чем в трех СМ, экранированных водным объемом черенковского детектора под зенитными углами более  $55^\circ$ . Для таких условий характерные значения энергии первичных частиц превышают  $10^{16}$  эВ. События второй выборки, зарегистрированные в период с 03.05.2012 по 15.02.2018 гг. ( $\sim 60$  тыс. групп,  $\sim 1477$  сут “живого” времени), после программного отбора дополнительно просматривались операторами.

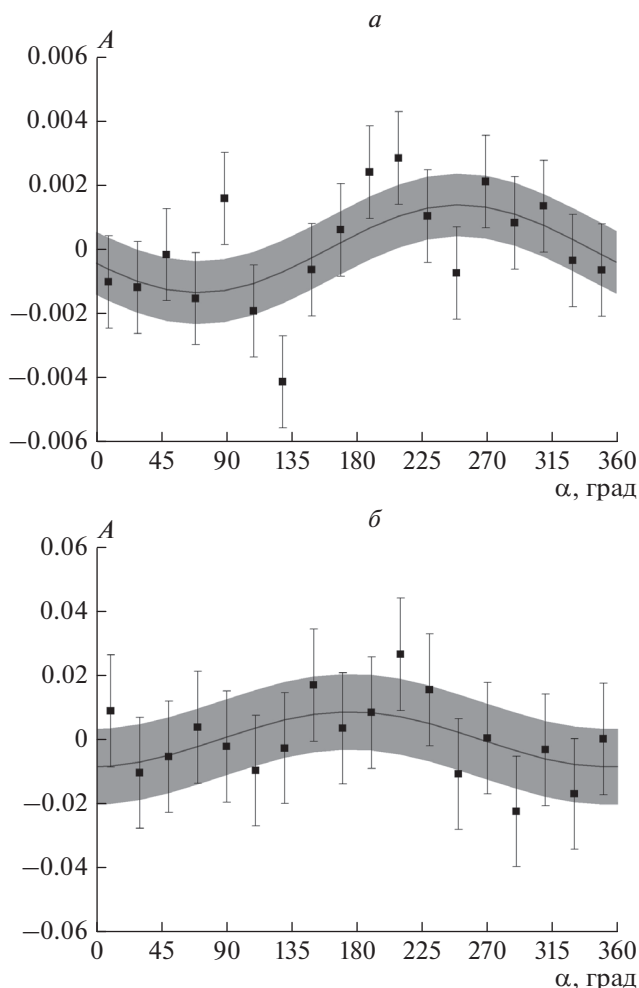


**Рис. 1.** Анизотропия по направлениям прихода групп мюонов в проекции Hammer-Aitoff для событий первой выборки с  $E > 10^{15}$  эВ (а) и второй выборки с  $E > 10^{16}$  эВ (б).

Направления прихода групп мюонов (азимутальный и зенитный углы) были пересчитаны из собственной локальной системы координат, которая повернута на  $34.7^\circ$  по часовой стрелке относительно земного меридиана, во вторую экваториальную систему координат (прямое восхождение  $\alpha$  и склонение  $\delta$ ). Для анализа использовались статистически хорошо обеспеченные области, для первой выборки это диапазон склонений  $[-8^\circ, +90^\circ]$ ; для второй выборки диапазон склонений  $[+14^\circ, +72^\circ]$ .

### ДИПОЛЬНАЯ АНИЗОТРОПИЯ ПО ГРУППАМ МЮОНОВ

На высоту генерации групп мюонов оказывает влияние изменение параметров атмосферы, что приводит к изменению плотности мюонов в группе на уровне детектора и, как следствие, к изменению кратности зарегистрированных треков. Поэтому ожидаемое число групп мюонов с определенного направления рассчитывалось с учетом влияния атмосферных эффектов для каждой минуты звездных суток. Согласно работе [7] для этого использовался коэффициент, связанный с высотой над уровнем моря слоя атмосферы с давлением 500 мбар.



**Рис. 2.** Относительные отклонения числа зарегистрированных событий от изотропных в зависимости от прямого восхождения, и диапазон возможных амплитуд дипольной анизотропии (серым цветом), определенные для фаз, соответствующих указанным значениям  $\alpha$ , для событий первой выборки с  $E > 10^{15}$  эВ (а) и второй выборки с  $E > 10^{16}$  эВ (б).

В качестве определения степени анизотропии используется относительное отклонение измеренного количества групп мюонов ( $N_{изм}$ ) от ожидаемого ( $N_{ож}$ ) для выбранной угловой ячейки прихода ПКЛ за длительный период измерений:  $A = (N_{изм} - N_{ож})/N_{ож}$ . Совокупность относительных отклонений для всех ячеек формирует матрицу анизотропии (рис. 1).

Визуально можно сказать, что для выборки с  $E > 10^{15}$  эВ на карте заметен дипольный характер распределения ПКЛ с избытком событий в направлении  $\sim 260^\circ$  и их недостатком в направлении  $\sim 80^\circ$  по прямому восхождению вблизи экваториальной плоскости.

Для оценки амплитуд и фаз дипольной анизотропии данные распределения были спроецированы на ось прямого восхождения (рис. 2). Аппрок-

**Таблица 1.** Сравнение результатов измерений параметров дипольной анизотропии

Установка	Энергия, ПэВ	Диапазон склонений	Амплитуда	Фаза по прямому восхождению
IceCube	~1.4	–90°; –25°	$(6.0 \pm 1.5) \times 10^{-4}$	$260^\circ \pm 10^\circ$
Tibet ASγ	~1.00	–30°; +90°	$(13.0 \pm 3.0) \times 10^{-4}$	$286.6^\circ \pm 12.6^\circ$
ДЕКОР	>1	–8°; +90°	$(13.7 \pm 4.8) \times 10^{-4}$	$249^\circ \pm 10^\circ$

симация данных функцией  $f(\alpha) = \text{const}$  соответствует гипотезе об изотропном потоке. Значение  $\chi^2/\text{d. o. f.}$  (d. o. f. – degrees of freedom, число степеней свободы) для первой выборки равно в этом случае 25/17, а для второй выборки – 9/17. Для проверки гипотезы о наличии дипольной анизотропии данные аппроксимировались зависимостью вида  $f(\alpha) = A \cos(\alpha - \varphi)$ , где  $A$  – амплитуда, а  $\varphi$  – фаза анизотропии. На рис. 2 серым цветом показана область ( $\pm 2\sigma$ ) найденных значений амплитуд для фаз, равных указанному значению прямого восхождения ( $\alpha$ ). В данном случае для первой выборки  $\chi^2/\text{d. o. f.}$  принимает значение 17/15 при  $A = (13.7 \pm 4.8) \times 10^{-4}$  и фазе  $249^\circ$ , а для второй – 7/15 при  $A = (8.8 \pm 5.8) \times 10^{-3}$  и фазе  $175^\circ$ .

Для 10% уровня значимости величина  $\chi^2/\text{d. o. f.}$  для гипотезы изотропного потока практически равна критическому значению. Следовательно, предпочтительнее принять гипотезу о наличии дипольной анизотропии, для которой  $\chi^2/\text{d. o. f.} = 17/15$ . Для второй выборки критерий Пирсона практически не меняет свое значение.

Таким образом, можно считать, что для первой выборки определено наличие дипольной анизотропии, а для второй выборки анизотропия пока не выявлена; верхнее ограничение для амплитуды в этом случае составляет  $2.0 \times 10^{-2}$  с 95% уровнем достоверности.

Результаты измерения параметров дипольной анизотропии, полученные на ДЕКОР, могут быть сопоставлены с установками, регистрирующими события в близких энергетических диапазонах. К таким установкам относятся: Tibet Air Shower Array [8] и IceCube [9]. Сравнение результатов измерения параметров дипольной анизотропии, полученных на этих установках, совместно с данными, полученными на ДЕКОР, приведено в табл. 1.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа данных, зарегистрированных в период 2012–2018 гг. на координатно-трековом детекторе ДЕКОР для двух выборок событий, соответствующих энергиям  $E > 10^{15}$  эВ и

$E > 10^{16}$  эВ, сделаны оценки параметров крупномасштабной дипольной анизотропии.

Для энергии  $E > 10^{15}$  эВ фаза дипольной анизотропии с амплитудой  $\sim 10^{-3}$  соответствует направлению на центр Галактики. Для диапазона  $E > 10^{16}$  эВ при фазе  $\sim 175^\circ$  по прямому восхождению получено верхнее ограничение для амплитуды дипольной анизотропии.

Результаты ДЕКОР хорошо согласуются с данными IceCube и Tibet ASγ, при этом данные, получаемые на этих трех установках, перекрывают всю небесную сферу.

Работа выполнена на уникальной научной установке “Экспериментальный комплекс НЕВОД” при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Программа повышения конкурентноспособности НИЯУ МИФИ № 02.a03.21.0005), а также гранта Президента РФ МК-2563.2017.2.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bogdanov A.G., Kokoulin R.P., Mannocchi G. et al. // *Astropart. Phys.* 2018. V. 218. P. 13.
2. Барбашина Н.С., Езубченко А.А., Кокоулин Р.П. и др. // ПТЭ. 2000. № 6. С. 20; Barbashina N.S., Ezubchenko A.A., Kokoulin R.P. et al. // *Instr. Exp. Tech.* 2000. V. 43. P. 743.
3. Петрухин А.А. // УФН. 2015. № 5. С. 521; Petrukhin A.A. // *Phys. Usp.* 2015. V. 58. № 5. P. 486.
4. Киндин В.В., Амельчаков М.Б., Барбашина Н.С. и др. // ПТЭ. 2018. № 5. С. 23.; Kindin V.V., Amelchakov M.B., Barbashina N.S. et al. // *Instr. Exp. Tech.* 2018. V. 61. № 5. P. 649.
5. Амельчаков М.Б., Воробьев В.С., Ижбулякова З.Т. и др. // *Ядер. физ. и инжиниринг.* 2017. Т. 8. № 4. С. 1.
6. Богданов А.Г., Громушкин Д.М., Кокоулин Р.П. и др. // ЯФ. 2010. Т. 73. № 11. С. 1904; Bogdanov A.G., Gromushkin D.M., Kokoulin R.P. et al. // *Phys. Atom. Nucl.* 2010. V. 73. P. 1852.
7. Kokoulin R.P., Bogdanov A.G., Dushkin L.I. et al. // *J. Phys. Conf. Ser.* 2016. V. 675. Art. № 032034.
8. Aartsen M.G., Abraham K., Ackermann M. et al. // *Astrophys. J.* 2016. V. 826. P. 220.
9. Amenomori M., Bi X.J., Chen D. et al. // *Astrophys. J.* 2010. V. 711. P. 119.