

ИССЛЕДОВАНИЕ АНИЗОТРОПИИ
ПОТОКА КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ
ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ ($10^{15} - 10^{17}$ эВ)
ПО ГРУППАМ МЮОНОВ,
ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫМ
КООРДИНАТНО-ТРЕКОВЫМ
ДЕТЕКТОРОМ ДЕКОР

*М. Б. Амельчаков, В. С. Воробьев, З. Т. Ижбулякова,
А. А. Ковыляева, С. С. Хохлов **

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

Обсуждаются первые результаты исследований анизотропии космических лучей по группам мюонов, зарегистрированным в координатно-трековом детекторе ДЕКОР экспериментального комплекса НЕВОД во время измерительных серий 2013–2017 гг. Анализируются две выборки событий, отличающиеся множественностью мюонов, условиями отбора и диапазонами зенитных и азимутальных углов. Приводятся оценки параметров анизотропии потока первичных космических лучей с энергиями $10^{15} - 10^{17}$ эВ.

First results of investigation of the cosmic ray flux anisotropy by means of muon bundles registered with the coordinate-tracking detector DECOR of the experimental complex NEVOD during 2013–2017 are discussed. Two samples of events with different multiplicity of muons, selection criteria and range of zenith and azimuth angles are analyzed. The estimates of the anisotropy parameters of the primary cosmic ray flux with energies $10^{15} - 10^{17}$ eV are presented.

PACS: 13.85.Tp; 95.55.Vj; 95.85.Ry; 96.50.sd; 98.70.Sa

ВВЕДЕНИЕ

Изучение анизотропии космических лучей важно с точки зрения выяснения характера движения релятивистских заряженных частиц в космическом пространстве и распределения их источников. Основной проблемой при определении источников космических лучей является «запутывание» заряженных

*E-mail: SSKhokhlov@mephi.ru

частиц в магнитных полях нашей Галактики. В магнитном поле частица движется по спирали, радиус которой прямо пропорционален ее энергии и обратно пропорционален напряженности поля. Траектория частицы с энергией $E = 10^{18}$ эВ имеет радиус кривизны в Млечном Пути порядка 1000 пс. Диаметр Галактики ~ 30 кпс, и этого вполне достаточно, чтобы удержать частицу внутри галактического диска.

Запутывание частиц в магнитных полях приводит к тому, что их поток со всех направлений выравнивается и становится квазиизотропным. Однако существуют факторы, связанные с формой Галактики и динамикой объектов внутри нее, которые могут приводить к анизотропии потока частиц в выделенных направлениях.

В диффузионной модели распространения космических лучей в Галактике имеется постоянный поток космических лучей от центральных областей к ее периферии. Градиент плотности космических лучей должен проявляться как дипольная анизотропия с направлением на галактический центр. Ожидаемая величина анизотропии согласно [1] при энергиях частиц $10^{15} - 10^{17}$ эВ составляет $10^{-3} - 10^{-2}$ соответственно.

Анизотропия, связанная с движением Солнечной системы относительно космических лучей, называется эффектом Комптона–Геттинга (КГ), по имени его первооткрывателей [2]. Степень анизотропии определяется формулой [3]

$$\delta = (\alpha + 2) \frac{w}{v}, \quad (1)$$

где α — показатель дифференциального энергетического спектра космических лучей; w — скорость перемещения Солнца; v — скорость частиц.

Характеристики движения Солнца приводятся в различных системах отсчета, связанных с ближайшими звездами, с межзвездным газом, с центром Млечного Пути. Относительно близких звезд (удаленных не более, чем на 100 пк) Солнце движется со скоростью ~ 19 км/с в направлении точки на небесной сфере с координатами во 2-й экваториальной системе $\alpha \approx 270^\circ$ и $\delta \approx +30^\circ$. Относительно межзвездного газа Солнце движется со скоростью 22–25 км/с в направлении $\alpha \approx 258^\circ$ и $\delta \approx -17^\circ$. Ожидаемая анизотропия потока в соответствии с формулой (1) в обоих случаях равна $\sim 3,0 \cdot 10^{-4}$. Вместе с ближайшими звездами и межзвездным газом Солнце участвует во вращении вокруг центра Галактики. Вблизи Солнца значение скорости вращения составляет примерно 220–230 км/с, причем вектор скорости лежит в плоскости Галактики и перпендикулярен направлению на галактический центр. Апокс имеет галактические координаты $l = 90^\circ$, $b = 0^\circ$ или, в более привычных экваториальных координатах, $\alpha = 318^\circ$, $\delta = +48^\circ$. В данном случае ожидаемая анизотропия потока может уже составлять приблизительно $3,4 \cdot 10^{-3}$. Исследования на детекторе IceCube [4] показали, что амплитуда анизотропии космических лучей уменьшается и практически исчезает при

переходе от ТэВ-ных к ПэВ-ным энергиям ПКЛ. Направление диполя (фаза анизотропии) при этом смещается от созвездия Орион к галактическому центру. При больших энергиях пока не найдено никаких статистически значимых отклонений от изотропного распределения потока космических лучей и в основном даются верхние оценки для амплитуд дипольного и квадрупольного моментов как функций направления на небесной сфере. Согласно данным совместных исследований, выполненных коллаборациями Telescope Array и Обсерватория им. Пьера Оже [5, 6], для энергетического диапазона более 10^{18} эВ верхняя оценка для амплитуды не превышает 10%.

1. РЕГИСТРАЦИЯ ГРУПП МЮОНОВ

Координатно-трековый детектор ДЕКОР [7] (рис. 1) входит в состав экспериментального комплекса НЕВОД (НИЯУ МИФИ, Москва). Восемь супермодулей (СМ) детектора ДЕКОР расположены вдоль трех сторон бассейна черенковского водного детектора (ЧВД) [8]. Каждый супермодуль с рабочей площадью $\sim 8,4$ м² состоит из восьми вертикальных плоскостей стримерных трубок. Двухкоординатный съем информации со стримерных трубок обеспечивает точность локализации треков заряженных частиц ~ 1 см и угловую точность реконструкции треков мюонов $\sim 0,8^\circ$. Вертикальное расположение плоскостей СМ позволяет регистрировать группы мюонов под большими зенитными углами.

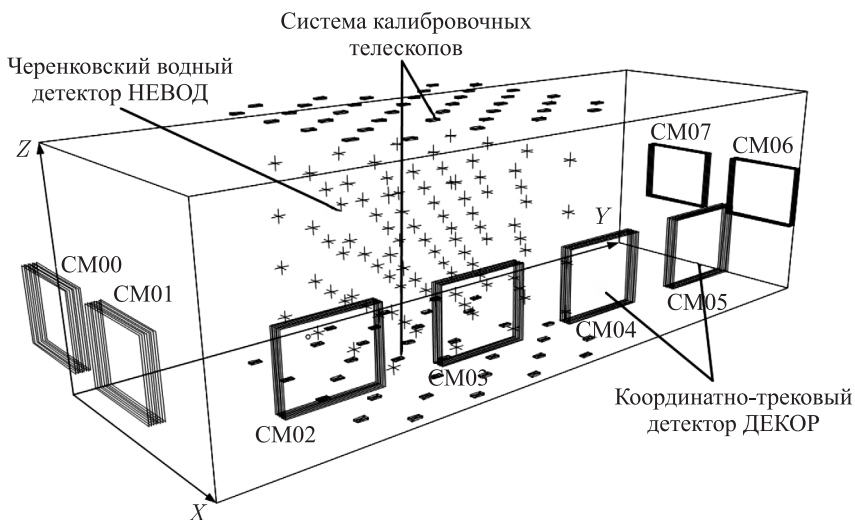


Рис. 1. Экспериментальный комплекс НЕВОД

События, зарегистрированные на установке ДЕКОР, представлены в виде последовательности наборов экспериментальных данных длительностью от 2 до 40 ч. Короткие наборы (менее 10 ч) исключались из анализа, так как всего в них содержалось не более 3 % всех событий.

В процессе обработки экспериментальных данных формировались два типа выборок событий. К первому типу (I) относятся события, в которых зарегистрировано как минимум три квазипараллельных трека мюонов не менее чем в трех СМ ДЕКОР. Группы мюонов в таких событиях формируются в основном при взаимодействии первичных космических частиц с атмосферой Земли при энергиях $10^{15} - 10^{16}$ эВ согласно ранее проведенным оценкам [9].

В выборке второго типа (II) находятся события, в которых зарегистрировано как минимум пять квазипараллельных треков мюонов не менее чем в трех СМ, экранированных водным объемом черенковского детектора, но при этом накладывается ограничение на зенитный угол $\theta > 55^\circ$. Для таких условий характерные значения энергии первичных частиц превышают 10^{16} эВ [9]. Более подробно метод отбора событий описан в [10] для выборки типа I и в [9] для выборки типа II.

События для выборки типа I (~ 6 млн событий) были зарегистрированы в период с 04 июня 2013 г. по 28 февраля 2017 г., и «живое» время измерения составило ~ 1016 сут. Для типа II выборки события (~ 38 тыс.) регистрировались с 16 июля 2013 г. по 07 января 2017 г. с «живым» временем ~ 944 сут.

2. УЧЕТ АТМОСФЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ

Поток групп мюонов на поверхности Земли меняется при изменении давления и распределения температуры в атмосфере. Исследования, описанные в работе [10], показали, что вместо двух параметров (давления и температуры) для отслеживания изменений потока можно использовать высоту расположения слоя атмосферы с давлением 500 мбар (H_{500}). Коэффициент, определяющий изменение интенсивности групп мюонов, рассчитывается по формуле

$$k = \left(\frac{H_{500}}{\langle H \rangle} \right)^B \sim \frac{F}{\langle F \rangle}, \quad (2)$$

где $\langle H \rangle$ — средняя высота слоя атмосферы с давлением 500 мбар за длительный промежуток времени; B — показатель степени, связанный с наклоном спектра локальных плотностей мюонов [9]; F — ожидаемый темп счета групп мюонов для данного значения H_{500} ; $\langle F \rangle$ — средний за длительный промежуток времени темп счета групп мюонов. Оценки параметров в формуле (2) получены в работе [10] по результатам анализа вариаций интенсивности групп I типа. Данные по значениям H_{500} брались из базы данных GDAS (Global Data

Assimilation System) [11]. В этих данных значения высот приводятся через каждые 3 ч средних солнечных суток.

3. РАСЧЕТ ОЖИДАЕМОГО ПОТОКА СОБЫТИЙ

Локальная система координат установки повернута относительно земного меридиана на $34,7^\circ$. Таким образом, ось OX направлена на юго-запад, а OY — на юго-восток. Направления прихода зарегистрированных групп мюонов для двух выборок в локальной системе координат приведены на рис. 2. Для выборки типа I существуют четыре выделенных направления в локальной системе с азимутальными углами $41, 134, 226$ и 320° . Основная доля событий для выборки типа I находится в диапазоне зенитных углов от 20 до 60° , а для типа II — от 55 до 65° .

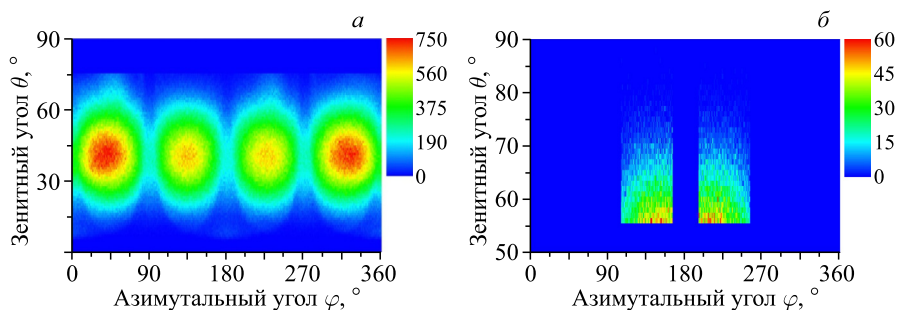


Рис. 2. Распределения углов для событий типа I (а) и типа II (б) в локальной системе координат

Ось вращения Земли совпадает с осью 2-й экваториальной системы, следствием чего является независимость значений склонения от момента регистрации. Таким образом, представленным на рис. 2 распределениям по зенитному и азимутальному углам соответствуют определенные распределения по склонению во 2-й экваториальной системе (рис. 3).

Если бы Земля не вращалась, то распределение событий во 2-й экваториальной системе координат выглядело бы так, как показано на рис. 4.

Для получения ожидаемого числа частиц с заданного направления прихода в координатах 2-й экваториальной системы используется разбиение небесной сферы на ячейки с равными телесными углами наблюдения. Телесный угол в экваториальной системе задается формулой

$$\Delta\Omega = \Delta \sin \delta \Delta\alpha. \quad (3)$$

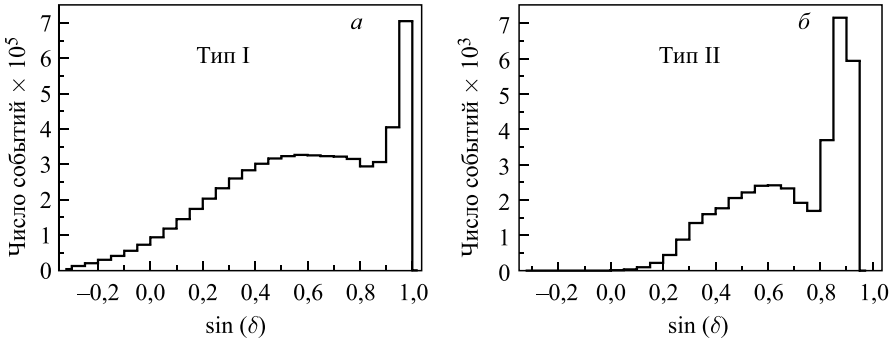


Рис. 3. Распределения склонения для направлений прихода групп мюонов во 2-й экваториальной системе для событий типа I (а) и типа II (б)

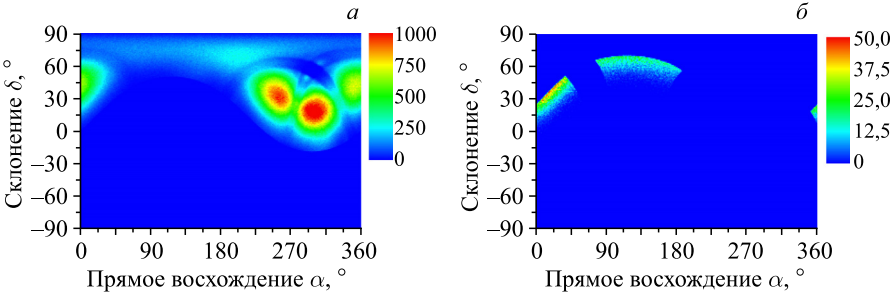


Рис. 4. Распределения координат прихода ПКЛ во 2-й экваториальной системе для фиксированного звездного времени для событий типа I (а) и типа II (б)

Для каждой элементарной ячейки $\Delta\Omega$ число событий ($N_{ож}$) за один экспериментальный набор (см. разд. 2) будет

$$N_{ож} = \langle F \rangle kg\Delta t, \tag{4}$$

где $\langle F \rangle$ — поток групп мюонов, усредненный за длительный промежуток времени (ожидаемый поток); Δt — время измерения в наборе; g — доля «живого» времени в наборе; k — фактор влияния атмосферы, рассчитанный по формуле (2). Чтобы получить ожидаемое число событий в ячейке $\Delta\Omega$ в заданный промежуток звездных суток τ , надо просуммировать произведения $kg\tau$ из всех используемых наборов данных. Величина τ была выбрана равной одной звездной минуте. Результат суммирования для двух выборок событий приведен на рис. 5.

Для расчета ожидаемого числа событий распределения на рис. 4 сдвигались вдоль оси прямого восхождения на одну минуту звездных суток, при этом число событий в каждой ячейке распределения умножалось на вес дан-

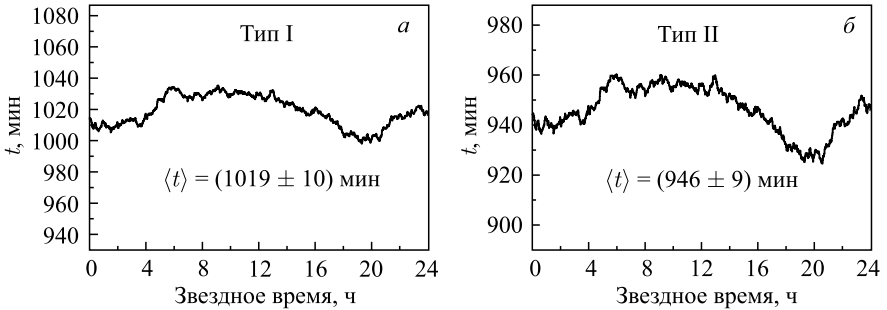


Рис. 5. Распределение «живого» времени измерений с поправкой на влияние атмосферных эффектов для двух выборок событий

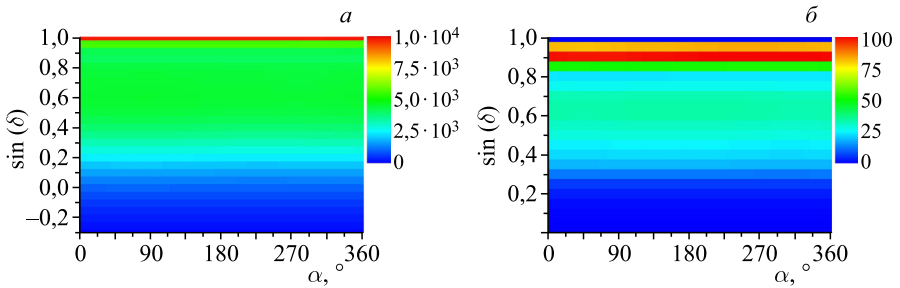


Рис. 6. Распределение ожидаемого количества групп мюонов в экваториальных координатах для событий типа I (а) и типа II (б)

ной звездной минуты в «живом» времени работы (см. рис. 5). В итоге полученные ожидаемые распределения количества групп мюонов по направлениям прихода во 2-й экваториальной системе имеют вид, представленный на рис. 6.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ

Для поиска анизотропии в выбранном угловом диапазоне прихода ПКЛ за длительный период измерений используется относительное отклонение измеренного количества групп мюонов ($N_{изм}$) от ожидаемого ($N_{ож}$):

$$A = \frac{N_{изм} - N_{ож}}{N_{ож}}. \tag{5}$$

Для двух выборок событий (тип I и тип II) матрица значений A имеет вид, представленный на рис. 7. Карты по анизотропии на рис. 7, а и б не дают возможности указать на наличие признаков крупномасштабной (дипольной) анизотропии.

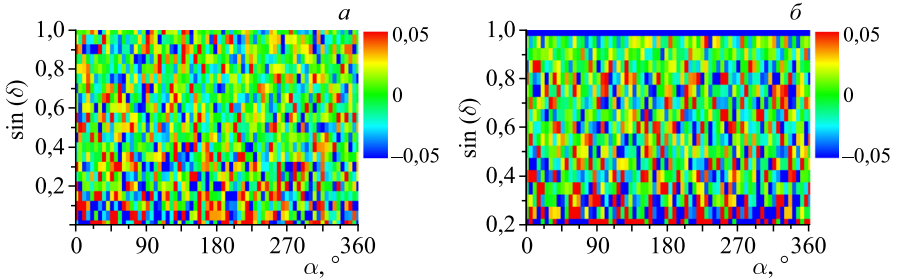


Рис. 7. Анизотропия по направлениям прихода групп мюонов для событий типа I (а) и типа II (б)

Проецирование данных на ось прямого восхождения (рис. 8) также не позволяет выявить значительное отклонение потока ПКЛ от изотропного. В предположении изотропного потока значение χ^2/dof для типа I выборки имеет значение 78/71, а для типа II — 66/71. Ограничение на амплитуду дипольной анизотропии может быть сделано при аппроксимации данных на рис. 8 зависимостью

$$f(\alpha) = A \cos(\alpha - \varphi), \quad (6)$$

где A — амплитуда анизотропии; φ — фаза. На рис. 8 серым цветом показана область (2σ) найденных значений амплитуд для фаз, равных указанным на зависимостях значениям прямого восхождения α . Таким образом, для выборки типа I максимальная амплитуда дипольной анизотропии составила $(4,8 \pm 5,8) \cdot 10^{-4}$ при фазе 260° , а для типа II — $(5,5 \pm 7,2) \cdot 10^{-3}$ при фазе 137° . Можно полагать, что с вероятностью 95,4% амплитуда дипольной анизотропии не превосходит значений $1,6 \cdot 10^{-3}$ и $2,0 \cdot 10^{-2}$ соответственно для диапазонов энергий ПКЛ $E > 10^{15}$ и $E > 10^{16}$ эВ.

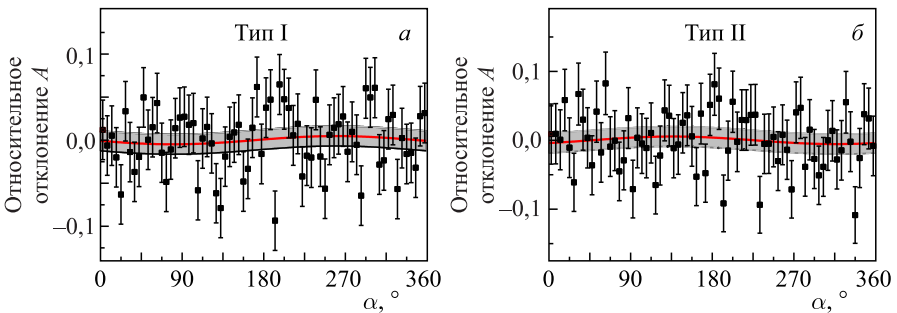


Рис. 8. Относительные отклонения числа событий с группами от ожидаемых в зависимости от прямого восхождения и диапазон возможных амплитуд анизотропии (области серого цвета), определенные для фаз, соответствующих указанным значениям α , для событий типа I (а) и типа II (б)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено исследование анизотропии потока космических лучей по группам мюонов, зарегистрированным в координатно-трековом детекторе на поверхности Земли в 2013–2017 гг. Сопоставление зарегистрированного и ожидаемого потоков для двух выборок событий типа I ($E > 10^{15}$ эВ, ~ 6 млн событий) и для выборки типа II ($E > 10^{16}$ эВ, ~ 38 тыс. событий) не позволило сделать статистически обеспеченных выводов о наличии анизотропии. Максимальная оценка амплитуды дипольной анизотропии составила $(4,8 \pm 5,8) \cdot 10^{-4}$ при фазе 260° для событий типа I и $(5,5 \pm 7,2) \cdot 10^{-3}$ при фазе 137° для событий выборки типа II.

Работа выполнена на уникальной научной установке экспериментального комплекса НЕВОД при поддержке Министерства образования и науки РФ (ПКС НИЯУ МИФИ № 02.а03.21.0005), а также гранта Президента РФ МК-2563.2017.2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Христиансен Г. Б., Куликов Г. В., Фомин Ю. А. Космическое излучение сверхвысокой энергии. М.: Атомиздат, 1975. С. 226–230.
2. Compton A. H., Getting I. A. An Apparent Effect of Galactic Rotation on the Intensity of Cosmic Rays // Phys. Rev. 1935. V. 47. P. 817–822.
3. Хаякава С. Физика космических лучей. Ч. 2. М.: Мир, 1974. С. 1–342.
4. Aartsen M. G., Abraham K., Ackermann M., Adams J., Aguilar J. A., Ahlers M., Ahrens M., Altmann D., Anderson T., Anseau I., Anton G., Archinger M., Argüelles C., Arlen T. C., Auffenberg J. Anisotropy in Cosmic Ray Arrival Directions in the Southern Hemisphere Based on Six Years of Data from the IceCube Detector. arXiv:1603.01227v2 [astro-ph.HE]. 2016.
5. Aab A., Abreu P., Aglietta M., Ahn E. J., Al Samarai I., Albuquerque I. F. M., Allekotte I., Allen J., Allison P., Almela A., Alvarez Castillo J., Alvarez-Muniz J., Alves Batista R., Ambrosio M., Aminaev A. Searches for Large-Scale Anisotropy in the Arrival Directions of Cosmic Rays Detected above Energy of 10^{19} eV at the Pierre Auger Observatory and the Telescope Array // Astrophys. J. 2014. V. 794. P. 172.
6. Deligny O. Large-Scale Distribution of Arrival Directions of Cosmic Rays Detected at the Pierre Auger Observatory above 10 EeV // J. Phys.: Conf. Ser. (ICRC2015). 2015.
7. Барбашина Н. С., Езубченко А. А., Кокоулин П. П., Компаниец К. Г., Коновалов А. А., Петрухин А. А., Чернов Д. В., Шутенко В. В., Янсон Э. Е. Координатный детектор для исследования горизонтального потока космических лучей // ПТЭ. 2000. № 6. С. 20–24.
8. Петрухин А. А. Черенковский водный детектор НЕВОД // УФН. 2015. № 5. С. 521.

9. Богданов А. Г., Громушкин Д. М., Кокоулин Р. П., Маннокки Дж., Петрухин А. А., Сааведра О., Тринкоро Дж., Чернов Д. В., Шутенко В. В., Яшин И. И. Исследование характеристик потока и взаимодействия космических лучей сверхвысоких энергий с помощью метода спектров локальной плотности мюонов // ЯФ. 2010. Т. 73, № 11. С. 1904–1920.
10. Kokoulin R. P., Bogdanov A. G., Dmitrieva A. N., Romanenkova E. V., Shutenko V. V., Yurina E. A. Atmospheric Effects in the Intensity of Muon Bundles and Geometrical Mechanism of Their Formation // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. V. 675. P. 032034.
11. NOAA Air Resources Laboratory (ARL). 2015. <http://ready.arl.noaa.gov/gdas1.php>.